

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средствам массовой коммуникации (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год
ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов, 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности],
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ, 05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность],
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 Материаловедение (по отраслям)]

Подписной индекс в каталоге
НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Харитоновна А.А.
Багдасарян А.А.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www.unitech-mo.ru

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Информационно-технологический вестник», допускается только с письменного разрешения редакции.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Артюшенко В.М., Воловач В.И.
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФОРМЫ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ РАДИОСИСТЕМ.....3

Воловач В.И., Ермолова С.В., Еремина Я.В.
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕГАУССОВСКИХ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ В РАДИОЛИНИЯХ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ РАДИОСИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИГАУССОВСКИХ МОДЕЛЕЙ.....12

Калачева Д.Н.
ГАРАНТИРОВАННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ – ОСНОВА АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ЕДИНИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.....20

Макаров В.М.
МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ АВТОНОМНЫХ И КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ.....34

Струкова А.В.
СИСТЕМА ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ «СИНТЕЗ-АР4».....50

Суханов В.И., Грабов А.Б.
ТОНКОПЛОЧНЫЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ДАТЧИКИ ТОКА.....59

Филиппович П.А., Гурова С.А.
МЕТОД СНИЖЕНИЯ ИНЕРЦИОННОСТИ ТЕРМОПАРНОГО КАБЕЛЯ КТМС НА ОСНОВЕ КАБЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ В АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ.....65

Храпов С.Д., Струкова А.В.
СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО СИГНАЛА ПЕРЕДАТЧИКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО МАКСИМАЛЬНУЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АППАРАТУРЫ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ РАДИОСИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПЛЕКСА ПОМЕХ.....72

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Аббасова Т.С.
РАЗВИТИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ.....79

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
2. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
3. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
4. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
5. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
6. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
7. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
8. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
9. **Смердов А.А.**, д.т.н., профессор
10. **Стрелянюк Ю.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 20.06.2019

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,2

Тираж 500 экз.

Заказ № 75-17

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

Вилисов В.Я.

**АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА
ИГРОВЫХ ИТЕРАЦИЙ.....89**

Емельянов П.В., Воейко О.А.

**ПРЕИМУЩЕСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
3D-ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АДДИТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ.....100**

Кравченко Н.А.

**ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРЫ КОМПЛЕКСОВ
ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....110**

Маслобоев А.В.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
В СИСТЕМЕ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ.....117**

Неустроев М.Ю.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦЕНТРА
ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫЗОВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ.....127**

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Сабо С.Е., Волков Н.В., Донской А.Д., Бугай И.В.,

Штрафина Е.Д.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ПОЛИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ.....137**

УДК 621.391.01

**Методы оценки формы плотности распределения вероятностей
в задачах обработки результатов измерений
авиационно-космических радиосистем**

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования, Поволжский государственный университет сервиса,
г. Тольятти

Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с методами оценки формы кривой плотности распределения вероятностей, для осуществления их классификации при обработке результатов измерений. Показано, что в качестве независимых признаков формы симметричных распределений можно принять значения величины контрэкссеса и энтропийного коэффициента. Рассмотрены рекуррентные процедуры получения текущих оценок их числовых характеристик.

Обработка результатов измерений, плотность распределения вероятностей, метод гистограмм, полигон частот, энтропийный коэффициент, контрэкссес, плоскость признаков.

Methods for estimating the shape of the probability density distribution in tasks of processing the results of measurements of aerospace radio systems

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
head of the Department of information technologies and control systems,
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor,
head of the Department «Information and electronic service»,
State budgetary educational institution of higher education

Volga region state University of service, Tolyatti

Reviewed and analyzed the related issues c assessment methods of curve density of distribution of probabilities for the implementation of their classification during the processing of the measurement results. It is shown that the values of the counterexcess and entropy coefficient can be taken as independent features of the shape of symmetric distributions. Recurrent procedures for obtaining current estimates

of their numerical characteristics are considered.

Processing of results of measurements, probability density function, histogram, polygon of frequencies, the entropy coefficient, contractes, the plane of the signs.

Как известно, при статистической обработке результатов наблюдений важнейшими характеристиками являются функция распределения и плотность распределения вероятностей (ПРВ). Практическим вопросам, связанным с оценкой этих функций и их использованием в задачах обработки результатов наблюдений, посвящено множество работ [1, 4, 7].

Как правило, при оценке ПРВ применяют два подхода. В первом случае предполагают, что ПРВ описывается функцией известного вида, зависящей от неизвестных параметров, определяющих эту функцию. Такой метод оценки называется параметрическим и сводится к оценке неизвестных параметров ПРВ [1, 6, 7].

Однако довольно часто при обработке результатов наблюдений априорная информация о ПРВ полностью или частично отсутствует. Зачастую удается сформулировать лишь самые общие сведения, такие, например, как гладкость, сосредоточенность внутри ограниченной области и т.д. В этих случаях применяют непараметрические методы [1, 4].

Интерес к этим методам вызван бурным развитием обучающихся систем, разработкой непараметрических алгоритмов решения задач идентификации, алгоритмов нелинейной фильтрации, адаптивных алгоритмов фильтрации и т.д.

Учитывая, что вопросы обработки экспериментальных данных результатов наблюдений тем или иным методом широко известны [7], рассмотрим более подробно метод гистограмм и полигон частот.

Метод гистограмм и полигон частот. Пусть случайная величина ξ , имеющая ПРВ $W_\xi(\xi)$, характеризуется последовательностью независимых наблюдений $\{\xi_h, h = \overline{1, N}\}$.

Часто, для характеристики случайной величины пользуются выборочной ПРВ $W_\xi(\xi)$ или гистограммой. Как правило, построение гистограмм осуществляется в следующей последовательности.

Определив область изменения случайной величины $[a, b]$, производят ее разбиение на N непересекающихся между собой интервалов $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$ равной длины $\delta = (b - a)/N$ и объединяют результаты n_i наблюдений, попавшие в каждый i -й интервал. Затем на этих интервалах строят прямоугольники высотой $n_i/N\delta$, из которых получают ступенчатую функцию $W_n(\xi) = n_i/N\delta$; $\xi \in \Delta_i$ называемую гистограммой.

Полученную гистограмму сравнивают с теоретической кривой:

$$W(\xi) = \delta^{-1} \int_{\Delta_i} W_n(\xi) d\xi, \xi \in \Delta_i.$$

Причем, если $W(\xi)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$, то вероятность

$$P\{\sup_{\xi \in [a, b]} |W_n(\xi) - W(\xi)| > \varepsilon\} \rightarrow 0 \text{ при } N \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty,$$

где \sup – математическая аббревиатура означающая: точная верхняя граница и точная нижняя граница множества (в англоязычной традиции lub); ε – величина, определяющая предельное значение погрешности.

Наряду с гистограммой пользуются понятием полигона частот $\varphi_{\text{п}}(\xi)$, который получают сглаживанием гистограмм, так что

$$\varphi_{\text{п}}(\xi) = \frac{[n+n_{k+1}]}{2H\delta + \frac{(\xi-a_k)(n_{k+1}-n_k)}{H\delta^2}}, \xi \in [x_k, x_{k+1}],$$

где $x_k, k = \overline{1, N}$ – середина промежутков Δ_k ; a_k – правый конец этого промежутка.

Заметим, что

$$\varphi_{\text{п}}(x_k) = \frac{n_k}{H\delta}; \varphi_{\text{п}}(x_{k+1}) = \frac{n_{k+1}}{H\delta}.$$

Полигон частот $\varphi_{\text{п}}(\xi)$ является состоятельной оценкой $W(\xi)$, то есть

$$P\{\max_{\xi \in [a,b]} |\varphi_{\text{п}}(\xi) - W(\xi)| > \varepsilon\}_{H \rightarrow \infty} \rightarrow 0,$$

если $W(\xi)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$.

Оценка ПРВ $W(\xi)$ полигоном частот позволяет построить для $W(\xi)$ доверительную область с заданной доверительной вероятностью β .

Методы классификации распределений. Часто экспериментально полученные гистограммы аппроксимируются подходящим аналитическим выражением. В качестве меры близости истинной ПРВ $W(\xi)$ и аппроксимирующей ПРВ $W_{\text{апр}}(\xi)$, принадлежащей некоторому определенным образом выбранному параметрическому классу

$$\{W_{\text{апр}}(\xi, \vec{\lambda}), \vec{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}\},$$

где λ – неизвестные значения параметров, может использоваться, например, минимум меры Кульбака J_k [1].

Применение данной меры обеспечивает минимум потери информации вследствие аппроксимации и означает, что в аппроксимирующей ПРВ $W_{\text{апр}}(\xi, \vec{\lambda})$ параметры $\vec{\lambda}$ подбираются таким образом, чтобы минимизировать интервал:

$$J_k(\lambda) = \int W(\xi) \ln \frac{W_0(\xi, \lambda)}{W(\xi)} d\xi,$$

где $W_0(\xi, \lambda)$ – начальная ПРВ ξ и λ , то есть $\vec{\lambda}$ выбирают из условия

$$\vec{\lambda} = \max^{-1} \{ \int W(\xi) \ln W_0(\xi, \lambda) d\xi \}.$$

Известны и другие способы классификации распределений.

Например, Р. Пирсон предложил использовать в качестве координат признаков коэффициенты эксцесса и асимметрии ПРВ. Однако это оказалось неперспективным, так как при асимметрии равной нулю все симметричные ПРВ располагались по оси эксцесса.

Более конструктивным оказалось использование понятия энтропийного коэффициента, изменяющегося для любых ПРВ в пределах от 0 до 2,066.

$$k = \Delta_3 / \sigma,$$

где σ – среднеквадратическим отклонением (СКО) случайной величины ξ ; $\Delta_3 = 0,5 \exp H$ – энтропийное значение погрешности [3];

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} W(\xi) \ln W(\xi) d\xi - \text{энтропия ПРВ.}$$

Так, для равномерной ПРВ $\Delta_3 = \sqrt{3}\sigma = 1,73\sigma$ и, следовательно, $k = 1,73$; для нормальной ПРВ $\Delta_3 = \frac{\sigma\sqrt{2\pi e}}{2} = \sqrt{0,5\pi e}\sigma \approx 2,066\sigma$ и $k = 2,066$; для ПРВ Лапласа $k = 1,93$; для арксинусоидальной ПРВ $k = \frac{\pi}{\sqrt{8}} = 1,11$ и т.д.

В качестве второго независимого признака, характеризующего форму ПРВ, можно принять коэффициент эксцесса

$$k_3 = \mu_4 / \sigma^4$$

равный отношению четвертого центрального момента μ_4 к квадрату дисперсии σ^2 . Однако для различных ПРВ k_3 может меняться от нуля до бесконечности, поэтому для удобства производят его нелинейное преобразование: $1/\sqrt{k_3}$. Величина

$$\kappa = 1/\sqrt{k_3}$$

называется контрэксцессом и изменяется от 0 до 1.

При использовании данных независимых признаков любая ПРВ может быть изображена в системе координат (k, κ) точкой (рисунок 1) [3].

Так, например, экспоненциальной ПРВ, описываемой выражением

$$W(\xi) = \left\{ \frac{\alpha}{2\Gamma(\alpha-1)} \right\} \exp\{-|\xi|^\alpha\},$$

где α – показатель степени, параметр распределения; $\Gamma(\cdot)$ – Гамма-функция, для которой

$$k_3 = \frac{\Gamma(1/\alpha)\Gamma(5/\alpha)}{[\Gamma(3/\alpha)]^2},$$

$$\kappa = \frac{\Gamma(3/\alpha)}{[\Gamma(1/\alpha)\Gamma(5/\alpha)]^{0,5}},$$

$$k = \alpha^{-1} \exp\{\alpha^{-1}\} \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}},$$

соответствует кривая, проходящая через точки 2-6-7-5-8.

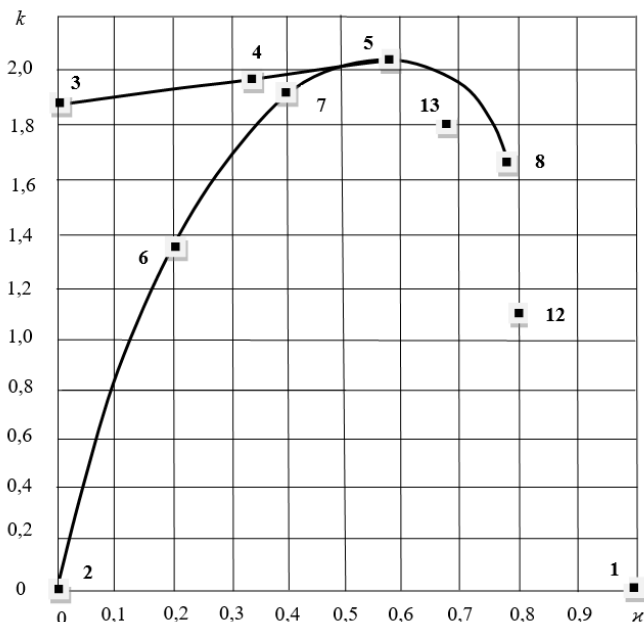


Рисунок 1 – Плоскость признаков, характеризующих форму ПРВ

Точка 2 соответствует $\alpha \rightarrow 0, \kappa \rightarrow 0, k \rightarrow 0$; точка 6 - $\kappa = 0,199, k = 1,35, \alpha = 1/2$; точка 7 - ПРВ с $\kappa = 0,408, k = 1,92, \alpha = 1$, то есть ПРВ Лапласа. Точ-

ка 5 соответствует гауссовской ПРВ.

Равномерному распределению, при $\alpha \rightarrow \infty$, соответствует точка 8 с координатами ($\kappa = 0,745, k = 1,73$).

Семейству ПРВ Стьюдента

$$W(\xi) = \Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right) \left\{ \sqrt{\pi\nu} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right) \left(1 + \frac{\xi^2}{\nu}\right)^{\frac{\nu+1}{2}} \right\}^{-1},$$

соответствует линия, проходящая через точки 2-3-4-5.

При $\nu = 1$, где ν – число степеней свободы, зависящее от числа n усредненных отсчетов, семейства распределений Стьюдента преобразуется в ПРВ Коши. В этом случае $\kappa = 0, \sigma = \infty, \Delta_3 = 2\pi$, то есть $\kappa = 0$ и $k = 0$.

Распределение Стьюдента при числе степеней свободы $\nu = 4$ имеет $\kappa = 0, k = 1,9$, чему соответствует точка 3. При $\nu = 5$ имеем $\kappa = 0,333, k = 1,97$ (точка 4). При $\nu \rightarrow \infty$ ПРВ Стьюдента стремится к гауссовской с $\kappa = 0,577, k = 2,066$ (точка 4).

Классу арксинусоидальных ПРВ

$$W(\xi) = \left[\pi x_m \sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{x_m}\right)^2} \right]^{-1} = \left(\pi \sqrt{x_m^2 - \xi^2} \right)^{-1},$$

с параметрами СКО $\sigma = x_m/\sqrt{2}$; $\mu_4 = 3x_m^4/8$; $k_3 = 1,5$; $\kappa = 0,816, k = 1,11$ соответствует точка 12. Здесь $x_m = x/\sin\omega t$ – максимальное значение отсчетов синусоидально изменяющейся во времени t , с частотой ω , случайной величины x ; μ_4 – четвертый центральные моменты генеральной совокупности.

Композиции двух равных арксинусоидальных ПРВ с $\kappa = 0,667, k = 1,18$ соответствует точка 13.

Таким образом, рассмотренные признаки формы ПРВ, в виде точек на плоскости с координатами (κ, k) , позволяют визуальнo дать оценку насколько близки или отличны друг от друга различные аналитические модели ПРВ, а также изображающие их точки, соответствующие той или иной модели экспериментальной ПРВ.

Рассмотренный метод имеет существенный недостаток. Связан он с тем, что если значения энтропийного коэффициента k и контрэкссеса κ исследуемой ПРВ определяются однозначно, то обратный переход не однозначен. Это связано с тем, что через точку с заданными координатами (κ, k) может проходить не одна, а множество кривых, соответствующих ПРВ различных классов.

Следует особо отметить, что рассмотренный метод определения признаков формы ПРВ будет справедлив, если форма ПРВ имеет симметричный, и, как правило, двухсторонний характер.

Если оцениваемая ПРВ имеет односторонний характер, характерная например мультипликативной помехе, то к рассмотренным параметрам необходимо добавить коэффициент асимметрии k_a . В результате данной ПРВ ставится в соответствие точка не на плоскости признаков (κ, k) , а точка в пространстве признаков (κ, k, k_a) .

В настоящее время широкое применение получили так называемые рекуррентные процедуры, позволяющие получить текущие оценки числовых характеристик исследуемых процессов имеющих случайный характер. В отличие

от апостериорных алгоритмов для их реализации необходимо гораздо меньшей емкости памяти обрабатывающего компьютера.

Рекуррентная оценка начальных моментов i -го порядка. При наблюдении отсчетов случайного процесса $\xi_h, h = \overline{1, H}$ рекуррентные оценки начальных моментов i -го порядка m_i имеют следующий вид

$$\hat{m}_{i,h} = \hat{m}_{i,h-1} + h^{-1}(\xi_h - \hat{m}_{i,h-1}); m_0 = 0; h = \overline{1, H} \quad (1)$$

При известном математическом ожидании m_ξ , оценка дисперсии случайного процесса (2-го центрального момента M_2), может быть найдена исходя из выражения

$$\hat{M}_{2,h} = \hat{M}_{2,h-1} + h^{-1} [(\xi_h - m_\xi)^2 - \hat{M}_{2,h-1}]. \quad (2)$$

В этом случае, 3-ий и 4-ый центральные моменты будут определяться исходя из выражений:

$$\hat{M}_{3,h} = \hat{M}_{3,h-1} + h^{-1} [(\xi_h - m_\xi)^3 - \hat{M}_{3,h-1}]; \quad (3)$$

$$\hat{M}_{4,h} = \hat{M}_{4,h-1} + h^{-1} [(\xi_h - m_\xi)^4 - \hat{M}_{4,h-1}]. \quad (4)$$

Воспользовавшись (1) – (4), получим рекуррентные соотношения позволяющие определить, соответственно, коэффициенты асимметрии и эксцесса

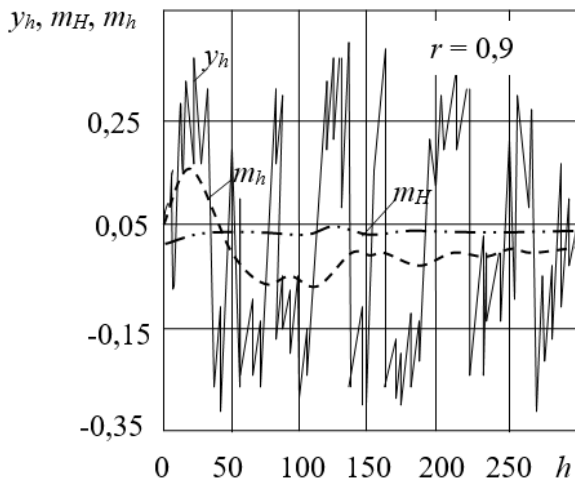
$$k_{a,h} = \hat{M}_{3,h} \hat{M}_{2,h}^{-1,5} \quad (5)$$

$$k_{\varepsilon,h} = \hat{M}_{4,h} / \hat{M}_{2,h}^2. \quad (6)$$

Для окончания процедуры вычисления, то есть определения необходимого числа измерений H , как правило, используется критерий, характеризующий требуемую точность измерения или допустимую погрешность измерения ε , определяемую исходя из неравенства

$$|\lambda_h - \lambda_{h-1}| \leq \varepsilon.$$

На рисунке 2 представлены результаты обработки случайного процесса $\{y_h\}$, мгновенные значения которого имеют бимодальный характер, где r – коэффициент корреляции; $m_H = \frac{\sum_{h=1}^H y_h}{h}$.



a)

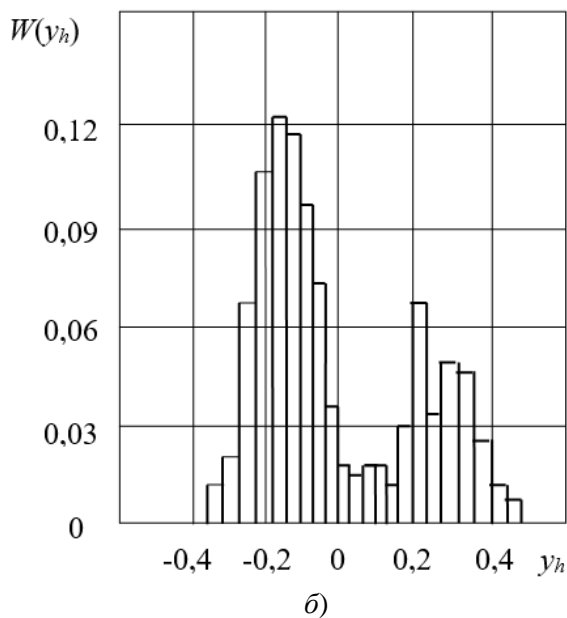
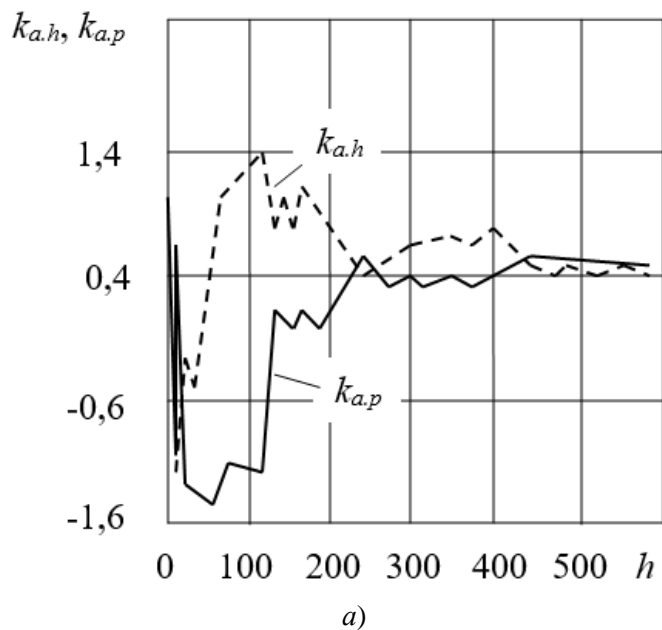


Рисунок 2 – Результаты обработки фрагмента случайного процесса $\{y_h\}$: *a* – зависимость математического ожидания и дисперсии от шага итерации; *б* – гистограмма ПРВ мгновенных значений



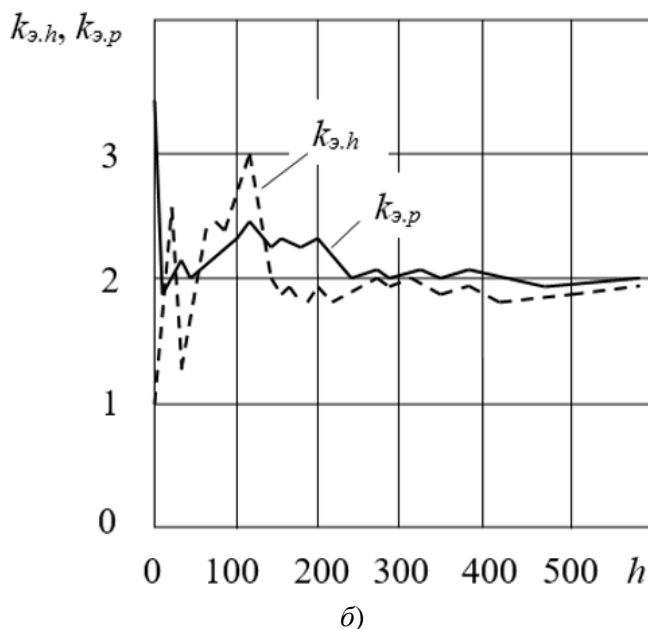


Рисунок 3 – Результаты численного моделирования от шага итерации: *a* – коэффициент асимметрии; *б* – эксцесса

Здесь, кривые, вычисленные по формулам (5) и (6) изображены сплошными линиями, пунктирными – по не рекуррентным формулам и конечной выборке [4]. Как видно из представленных графиков, с увеличением числа выборок обе эти кривые сближаются, что указывает на идентичность процедур оценивания по рекуррентным и не рекуррентным алгоритмам.

Отметим, что энтропийный коэффициент может быть численно определен по гистограмме исходя из выражения:

$$k = \frac{dn}{2\sigma} 10^{-n^{-1} \sum_{j=1}^l n_j \lg n_j}.$$

Здесь переменная n определяет объем выборки; d и l , соответственно, ширину и число столбцов гистограммы; n_j – число наблюдений в j -м столбце ($j = \overline{1, m}$). Прямая черта сверху означает усреднение по множеству.

Оценка рассеяния оценок параметров ПРВ. На практике очень важным является получение оценки рассеяния оценок σ , μ и k в зависимости от значений n и k_3 ПРВ. Это можно осуществить с помощью следующих формул.

Так, дисперсия D выборочной дисперсии D^* при $n > 20$ с погрешностью 10% может быть найдена с помощью выражений

$$D[D^*] = \frac{\mu_4 - \sigma^4}{n}; \quad \sigma[\sigma^*] = \frac{\sqrt{\mu_4 - \sigma^4}}{2\sigma/\sqrt{n}},$$

где $\sigma[\sigma^*]$ – СКО выборочной СКО σ^* .

В этом случае, относительная средняя квадратическая погрешность деления σ^* будет определяться как:

$$\delta(\sigma^*) = \frac{\sigma(\sigma^*)}{\sigma} = \frac{\sqrt{k_3 - 1}}{2\sqrt{n}}.$$

Рассеяние оценки μ с погрешностью 8-10% может быть определено как:

$$\delta(\varkappa) = \frac{\sigma(\varkappa^*)}{\varkappa} = \frac{\sqrt[4]{(k_3^2 - 1)^3}}{\sqrt{29n}}$$

Рассеяние оценок k и энтропийной погрешности Δ_3 будет определяться как:

$$\sigma(k) = \frac{0,9}{\varkappa k \sqrt{kn}}; \delta(k) = \frac{\sigma(k)}{k} = \frac{0,9}{\varkappa k^2 \sqrt{kn}}$$

$$\delta(\Delta_3) = \frac{\sigma(\Delta_3)}{\Delta_3} \approx \sqrt{\frac{9,15 \times 10^{-4}}{(1-\varkappa)^3 + 5,1(1-\varkappa)^3}}$$

Выводы. Таким образом, рассмотрен и проанализирован метод определения признаков формы симметричных двухсторонних ПРВ. Показано, что в качестве независимых признаков формы ПРВ можно принять значения величины контрэкссесса \varkappa и энтропийного коэффициента k .

Если оцениваемая ПРВ имеет односторонний характер, то к рассмотренным признакам необходимо добавить коэффициент асимметрии k_a , тогда оцениваемой ПРВ ставится в соответствие точка не на плоскости признаков (\varkappa, k) , а точка в пространстве признаков (\varkappa, k, k_a) . Рассмотрены рекуррентные процедуры получения текущих оценок их числовых характеристик.

Литература

1. Ершов А.Л. Стабильные методы оценки параметров (обзор) // Автоматика и телемеханика, 1978. № 8. С.66-100.
2. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений // М.: Наука, 1966. 587 с.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций // М.: Наука, 1968. 464 с.
5. Стогов Г.В., Макшаков А.В., Мусаев А.А. Устойчивые методы обработки результатов наблюдений // Зарубежная радиоэлектроника, 1982. № 9. С.3-46.
6. Статистическая классификация, основанная на выборочных распределениях / Иголочкин В.Н., Ковригин А.Б., Старшинов А.И., Хохлов В.А. // Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 104 с.
7. Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования // Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. 320 с.

УДК 621.391.26

**Представление негауссовских сигналов и помех в радиолиниях
авиационно-космических радиосистем
с помощью полигауссовских моделей**

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
С.В. Ермолова, аспирант кафедры «Информационный и электронный сервис»,
Я.В. Еремина, аспирант кафедры «Информационный и электронный сервис»,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с полигауссовским представлением случайных негауссовских сигналов и помех в радиолиниях авиационно-космических радиосистем. Показано, что реальные сигналы и негауссовские помехи могут быть представлены соответствующими полигауссовскими процессами. Рассмотрены и проанализированы свойства полигауссовских случайных процессов. Проанализирована взаимосвязь параметров смеси сигналов и помех и их компонент.

Анализ и синтез приемной радиоаппаратуры, сигналы и помехи с негауссовским характером распределения, полигауссовское представление случайных процессов, ковариационных функций и моменты распределений.

**View naguszewski signals and radio interference aerospace systems using
polyustrovskij models**

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor,
head of the Department «Information and electronic service»,
S.V. Yermolova, post-graduate student of the Department
«Information and electronic service»,
Ya.V. Yeremina, post-graduate student of the Department
«Information and electronic service»,
Federal state budgetary educational institution of higher
education, Volga state University service, Togliatti

Reviewed and analyzed issues related to Polyustrovsky naguszewski representation of random signals and noises in the PA-dilinjah aerospace systems. It is shown that real signals and non-Gaussian noise can be represented by the corresponding poly-Gaussian processes. The properties of poly-Gaussian random processes are considered and analyzed. The relationship between the parameters of the mixture of signals and noise and their components is analyzed.

Analysis and synthesis of receiving radio equipment, signals and noise with non-

Gaussian nature of distribution, poly-Gaussian representation of low-tea processes, covariance functions and moments of distribution.

При осуществлении анализа и синтеза радиолиний авиационно-космических радиосистем необходимо как можно точнее смоделировать используемые сигналы и воздействующие на них, как правило, негауссовские помехи [1-5].

Подавляющее число публикаций посвящено гауссовским распределениям [7-11]. Использованию конкретных частных моделей в виде смеси гауссовских случайных явлений в радиотехнике посвящены исследования представленные в [8]. Различные вопросы фильтрации случайных «условно-гауссовских» процессов изложены в [10]. Методы разложения смесей по компонентам приведены в работе [9].

Впервые, в работах [6, 12] была показана возможность аппроксимации случайных процессов с непрерывным временем полигауссовскими моделями. Показано, что практически все встречающиеся в радиотехнике сигналы и помехи, имея ограниченное время существования, энергию, эффективную полосу частот, могут описываться интегрируемыми функциями, а, следовательно, допускать полигауссовскую аппроксимацию.

Полигауссовское представление случайных сигналов и негауссовских помех. Как известно, случайный процесс, сигнал $s(t)$ или помеха $n(t)$ считаются полигауссовскими, если их соответствующие закон распределения вероятностей $F(\cdot)$ и плотность распределения вероятностей (ПРВ) $W(\cdot)$ могут быть представлены в виде гауссовских смесей, соответственно, в дискретной, непрерывной и дискретно-непрерывной форме:

$$F(\cdot) = \sum_k p_k F_k(\cdot); W(\cdot) = \sum_k p_k W_k(\cdot); \sum_k p_k = 1; \quad (1)$$

$$F(\cdot) = \int F_G(\cdot) dG; W(\cdot) = \int W_G(\cdot) dG; \int dG = 1; \quad (2)$$

$$F(\cdot) = \sum_k p_k \int F_{G_k}(\cdot) dG_k; W(\cdot) = \sum_k p_k \int W_{G_k}(\cdot) dG_k; \sum_k p_k \int dG_k = 1. \quad (3)$$

где p_k – вероятность наличия отдельных компонент; $F_k(\cdot), F_G(\cdot), F_{G_k}$ – гауссовские распределения вероятностей; $W_k(\cdot), W_G(\cdot), W_{G_k}$ – гауссовские ПРВ.

Однако необходимо отметить, что для использования полигауссовских моделей сигналов и помех с негауссовской ПРВ, в конкретных радиотехнических системах и устройствах, необходимо изучить технически удобные условия полигауссовских представлений произвольных ПРВ, особенности, разновидности, выборочные и другие свойства таких представлений, их физический смысл и соотношение с распространенными моделями используемых сигналов и воздействующих помех.

Гауссовские спектры сигналов и помех. Выражения (1) – (3), с учетом условий их существования, показывают возможность описания негауссовских сигналов и помех простым заданием вероятностей на множестве ковариационных функций и средних.

Так, если задать K пар вещественных функций с определенными вероятностями p_k , средними $m_k(t)$, и ковариациями $r_k(t_1, t_2)$, то при неотрицательной определенности $r_k(t_1, t_2)$ всегда найдутся гауссовские процессы со средними

$m_k(t)$, и корреляционными функциями $r_k(t_1, t_2)$. Образуя их смесь вида (1), получим определенный гауссовский процесс.

Следовательно, полигауссовские модели порождают своеобразные спектральные представления, в общем случае, негауссовских процессов, заданием вероятностей $\{p_k\}$ на множестве пар числовых $\{m_k, \sigma_k\}$ или функциональных $\{m_k(t), r_k(t_1, t_2)\}$ элементов.

Эти спектры, получившие названия гауссовские, в соответствии с выражениями (1) – (3), могут быть дискретными, решетчатыми, непрерывными и смешанными.

Дискретные и непрерывные гауссовские спектры сигналов и помех с непрерывным временем являются функционалами $p\{m_k(t), r_k(t_1, t_2)\}$, определенными на множестве начальных и вторичных моментных функций.

Если гауссовские компоненты различаются только средними или только ковариациями, то область задания спектров Гаусса будет одинарной. Это множество или только первых начальных, или только вторых центральных моментов функций.

В первом случае имеем гауссовский спектр средних, во втором – гауссовский спектр ковариаций. В общем случае имеем гауссовский спектр средних и ковариаций.

Рассмотрим полигауссовскую величину с постоянной дисперсией компонент, обращаясь к непрерывной форме представлений описывающихся выражением (2)

$$W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} q(m) \exp\left\{-\frac{(y-m)^2}{2\sigma^2}\right\} dm. \quad (4)$$

Взвешивающая функция $q(m)$ при заданной дисперсии σ определяется характеристической функцией $f(x)$ плотности $W(y)$:

$$q(m) = \int_{-\infty}^{\infty} q(m) \exp\{-jmx + 0,5\sigma^2 x^2\} dx. \quad (5)$$

Выражения типа (4) и (5) принято называть, соответственно, прямым и обратным преобразованием Гаусса.

На практике принято использовать только конечные области средних и ковариаций, то есть финитные спектры Гаусса. Условия существования полигауссовских моделей с конечным числом компонент свидетельствует о том, что практически все реальные сигналы и помехи обладают конечным эффективным дискретным спектром гаусса.

Особенно удобно преобразование Гаусса случайных сигналов и помех для статистического анализа.

Рассмотрим и проанализируем взаимосвязь параметров смеси и компонент.

Одномерный случай. Как известно, функция распределения полигауссовской случайной величины является смесью функций распределения компонент. Введем характеристическую функцию полигауссовской величины

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_n g_n W_n(x) \exp\{jxt\} dx.$$

В том случае, когда случайная величина ξ имеет начальный момент k -го порядка, то характеристическая функция этой величины имеет производную k -го порядка, причем

$$\frac{d^k \varphi(t)}{dt^k} = j^k \int_{-\infty}^{\infty} x^k W_n(x) \exp\{jxt\} dx,$$

тогда

$$\frac{d^k \varphi(t)}{dt^k} = j^k m^{(k)}(\xi),$$

где $m^{(k)}$ – моменты k -го порядка.

Следовательно, при $t = 0$ начальные моменты распределения отличаются от значения производных характеристической функции только множителем j^k .

Характеристическая функция полигауссовской случайной величины равна смеси характеристических компонент

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} W_n(x) \exp\{jxt\} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_n g_n W_n(x) \exp\{jxt\} dx = \\ &= \sum_n g_n W_n(x) \varphi_n(t). \end{aligned}$$

Начальный момент k -го порядка полигауссовской случайной величины равен смеси начальных моментов ее компонент

$$\left. \frac{d^k \varphi(t)}{dt^k} \right|_{t=0} = \left. \frac{d^k}{dt^k} \sum_n g_n \varphi_n(t) \right|_{t=0} = \sum_n g_n \left. \frac{d^k \varphi_n(t)}{dt^k} \right|_{t=0} = \sum_n g_n m_n^{(k)}.$$

Следовательно,

$$m^{(k)} = \sum_n g_n m_n^{(k)}.$$

Используя явные выражения $W_n(x)$ и $\varphi_n(t)$:

$$W_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left\{-\frac{(x-m_n)^2}{2\sigma_n^2}\right\},$$

$$\varphi_n(t) = \exp\left\{jm_n t - \frac{\sigma_n^2 t^2}{2}\right\},$$

Запишем, что начальные моменты k -го порядка могут быть найдены, исходя из выражения:

$$m^{(k)} = \frac{1}{j^k} \sum_n g_n \left. \frac{d^k}{dt^k} \exp\left\{jm_n t - \frac{\sigma_n^2 t^2}{2}\right\} \right|_{t=0}. \quad (6)$$

Из (6) при $k = 1$ находим, что математическое ожидание полигауссовской случайной величины равно смеси математических ожиданий компонент:

$$m^{(1)} = m = \sum_n g_n m_n.$$

Рассмотрим центральный момент смеси k -го порядка:

$$\begin{aligned} M^{(k)} &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - m)^k W_n(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \sum_n g_n m_n)^k \times \\ &\times \sum_n \frac{g_n}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left\{-\frac{(x-m_n)^2}{2\sigma_n^2}\right\} dx. \end{aligned}$$

Сделав замену $\frac{x-m_n}{\sigma_n} = z_n$ и проинтегрировав, получим

$$\begin{aligned} M^{(k)} &= \sum_n \frac{g_n}{\sqrt{2\pi}} \sum_{v=0}^k c_k^v (m_n - \sum_n g_n m_n)^{k-v} c_n^v \int_{-\infty}^{\infty} z_n \exp\left\{-\frac{z_n^2}{2}\right\} dz_n = \\ &= \sum_n g_n \sum_{v=0}^k [1 - (-1)^{v+1}] c_k^v c_k^v \frac{(m_n - \sum_n g_n m_n)^{k-v} v!}{2^{0.5v+1} (v/2)!}. \end{aligned} \quad (7)$$

При $k = 2$ из выражения (7) найдем дисперсию:

$$\begin{aligned} M^{(2)} &= \sigma^2 = \sum_n g_n [(m_n - \sum_n g_n m_n)^2 + \sigma_n^2] = \\ &= \sum_n g_n (m_n^2 + \sigma_n^2) - (\sum_n g_n m_n)^2. \end{aligned}$$

Выражение (7) также позволяет описать связь между центральными и начальными моментами.

Конечномерные случайные величины. Функция распределения многомерной полигауссовской случайной величины является смесью многомерных

гауссовских функций распределения компонент:

$$W(\vec{x}) = \sum_n g_n W_n(\vec{x}).$$

Характеристическая функция

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} W(x_1, \dots, x_l) \exp\{j\vec{t}'\vec{x}\} dx_1, \dots, dx_l,$$

определена для каждого действия вектора $\vec{t} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_l \end{pmatrix}$:

$$\varphi(\vec{t}) = \sum_n g_n \exp\{j\vec{t}'M_n - 0.5\vec{t}'\Sigma_n\vec{t}\},$$

$$\Sigma_n = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^{(n)} & \sigma_{12}^{(n)} & \dots & \sigma_{1l}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{l1}^{(n)} & \sigma_{l2}^{(n)} & \dots & \sigma_{ll}^{(n)} \end{pmatrix},$$

где Σ_n – корреляционные матрицы гауссовских компонент смеси.

Начальный момент k -го порядка случайной величины ξ_j определяется выражением

$$\begin{aligned} m^{(k)}(x_j) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_j^k W(x_1, \dots, x_l) dx_1, \dots, dx_l = \\ &= \sum_n g_n \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_j^k W_n(x_1, \dots, x_l) dx_1, \dots, dx_l = \sum_n g_n m_j^{(k)}(x_j) \end{aligned}$$

и равен смеси начальных моментов k -го порядка компонент смеси.

Смешанные моменты любого порядка совокупности n случайных величин определяется выражением

$$\begin{aligned} m^{(k)}(x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_l^{k_l}) &= \sum_n g_n \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} (x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_l^{k_l}) \times \\ &\times W_n(x_1, \dots, x_l) dx_1, \dots, dx_l = \sum_n g_n m_n^{(k)}(x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_l^{k_l}) \end{aligned}$$

и равны смеси начальных моментов того же порядка компонент.

Здесь k_j – любые положительные числа, включая и нуль; $j = 1, 2, \dots, l$,

$$\sum k_j = k.$$

Вектор математического ожидания полигауссовской случайной величины равен смеси векторов математических ожиданий компонент

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} \vec{m}_1 \\ \dots \\ \vec{m}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_v p_v m_1^v \\ \dots \\ \sum_v p_v m_n^v \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Второй начальный момент равен

$$\begin{aligned} m_2\{\vec{x}_n \vec{x}_j\} &= i^{-2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t_h \partial t_j} \Big|_{t=0} = i^{-2} \{ \sum_v p_v (i m_n^v - \sum_k \sigma_{hk}^v t_k) \times \\ &\times (i m_j^v - \sum_k \sigma_{kj}^v t_k) \varphi_v(t) - \sum_v p_v \sigma_{hj}^v \varphi_v(t) \} \Big|_{t=0} = \\ &= \sum_v p_v m_h^v m_j^v + \sum_v p_v \sigma_j^v, \end{aligned}$$

где $h, j = 1, 2, \dots, h$.

Для определения дисперсии воспользуемся соотношением, связывающим центральный и начальный моменты второго порядка:

$$M_2 = m_2 - m_1^2;$$

$$M_2\{x_j\} = M_1(\xi_j - m_j)^2 = D(\xi_j) = m_2 - m_1^2 =$$

$$= \sum_v p_v (m_j^v m_j^v + \sigma_j^v) - (\sum_v p_v m_j^v)^2,$$

где $j = 1, 2, \dots, n$.

Второй смешанный момент или ковариация случайных величин ξ_1 и ξ_2 :

$$\begin{aligned} M_2(x_i x_j) &= M_1(\xi_1 - m_1)(\xi_j - m_j) = m_2(x_i x_j) - m_1(x_i)m_1(x_j) = \\ &= \sum_v \rho_v (m_i^v m_j^v + \sigma_{ij}) - \sum_v \rho_v m_i^v \sum_v \rho_v m_j^v, \end{aligned} \quad (9)$$

где $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Таким образом, формулами (8) и (9) определяются элементы ковариационной матрицы смеси.

Полигауссовские процессы с непрерывным временем. Как известно, при непрерывном времени процессов, для ПРВ основную роль играют функционалы, а роль моментов выполняют соответствующие моменты функции.

Как и для случайных величин, по определению, указанные функционалы полигауссовских процессов равны смеси соответствующих функционалов компонент.

Таким образом, для характеристических функционалов полигауссовских процессов

$$\varphi[v(t)] = \sum_n g_n \varphi_n[v(t)], \quad g_n \geq 0, \quad \sum_n g_n = 1,$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_n[v(t)] &= \exp\{i \int_{-\infty}^{\infty} m(t)v(t)dt\} - \\ &- 0,5 \iint_{-\infty}^{\infty} B(t_1 t_2) v(t_1)v(t_2)dt_1 dt_2 \end{aligned}$$

– характеристический функционал гауссовской компоненты.

Моментные функции полигауссовского случайного процесса находятся аналогично моментам полигауссовских величин (8) и (9). Однако моментные функции k -го порядка полностью определяются k -мерным ПРВ. То есть, для определения моментных функций достаточно конечномерных ПРВ.

Рассмотрим прямые методы нахождения многомерных функций полигауссовских процессов, используя многомерные ПРВ случайных процессов.

Определим связь моментных функций и гауссовских компонент смеси. По определению смеси:

$$W(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n) = \sum_n g_n W_n(x_1, \dots, x_m, t_1, \dots, t_m),$$

где $g_n \geq 0$; $\sum_n g_n = 1$; $W_n(\cdot)$ – ПРВ многомерного случайного процесса:

$$\begin{aligned} W_n(x_1, \dots, x_m, t_1, \dots, t_m) &= [\sigma_1(t) \dots \sigma_m(t) \sqrt{(2\pi)^m \mathbf{D}}]^{-1} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2\mathbf{D}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \bar{D}_{ij} \frac{x_i - a_i}{\sigma_i} - \frac{x_j - a_j}{\sigma_j}\right\}; \end{aligned}$$

$$a_j = m_1\{\xi(t_j)\};$$

$$\sigma_j^2 = m_1\{[\xi(t_j) - a_j]^2\};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1m} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{m1} & D_{m2} & \dots & D_{mm} \end{bmatrix};$$

\bar{D}_{ij} – алгебраическое дополнение в определителе матрицы \mathbf{D} элемента матрицы \mathbf{D} : $D_{ii} = 1$; $D_{ij} = D_{ji}$.

Запишем общую формулу для определения моментных функций полига-

уссовских случайных процессов:

$$\begin{aligned} m(x_1, \dots, x_m, t_1, \dots, t_m) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t_1) x_2(t_2) \dots x_m(t_m) \times \\ &\quad \times W(x_1, t_1, \dots, x_m, t_m) dx_1, \dots, dx_m = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_1, \dots, x_m \times \\ &\quad \times \sum_n g_n W_n(x_1, \dots, x_m, t_1, \dots, t_m) dx_1, \dots, dx_m = \\ &= \sum_n g_n \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} x_1, \dots, x_m W_n(x_1, \dots, x_m, t_1, \dots, t_m) dx_1, \dots, dx_m = \\ &= \sum_n g_n m_n(x_1, \dots, x_m, t_1, \dots, t_m). \end{aligned}$$

Отсюда следует, что моментная функция порядка m смеси процессов равна смеси, взвешенной смеси, m -х моментов ее компонент.

Таким образом, для определения математического ожидания достаточно знания одномерных распределений, для смешанного момента второго порядка – двумерных. Связи между моментными функциями процесса и его компонент получаются аналогичными конечному случаю.

При конечном числе N гауссовских компонент смеси она обладает конечным числом $3N - 1$ степеней свободы, так как каждая компонента входит в смесь с тремя свободными параметрами: средним, ковариацией и вероятностью при условии нормировки.

В частности, это означает, что знание $3N - 1$ моментных функций совместно с указанием полигауссовского сигнала или помехи позволяет построить любые его характеристики.

Для гауссовского сигнала $N = 1$, достаточно задать две его моментные функции – среднее и ковариационную функцию, для получения любых характеристик.

Следует особо отметить полигауссовское представление совокупностей негауссовских процессов с вероятностными связями высоких порядков. В отличие от известных описаний корреляционного уровня [13], определяющих только взаимные ковариации второго порядка, это удобный и конструктивный способ, так как сложная совокупность взаимосвязанных сигналов или помех, определяется столбцом чисел $\{g_n\}$, столбцами функций $\{m_n(t)\}$ и квадратными матрицами функций $R_{nk}(t, \tau)$.

Полигауссовские модели системы сигналов позволяют классифицировать и количественно определять характер и степень их зависимости.

Выводы. Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с представлением негауссовских сигналов и помех в радиолиниях авиационно-космических радиосистем с помощью полигауссовских моделей. Показано, что реальные сигналы и негауссовские помехи могут быть представлены соответствующими полигауссовскими процессами, со счетным множеством гауссовских компонент, с определенными вероятностями, средними и ковариациями. Проанализированы дискретные и непрерывные гауссовские спектры сигналов и помех. Рассмотрены и проанализированы свойства полигауссовских случайных процессов.

Рассмотрены прямые методы нахождения многомерных функций полигауссовских процессов, используя многомерные плотности распределения вероятностей случайных процессов. Определена связь моментных функций и гауссовских компонент смеси. Показано, что для определения математического ожидания достаточно знания одномерных распределений, для смешанного момента

второго порядка – двумерных.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Описание сигналов и помех в радиоприемах авиационно-космических радиосистем с помощью полигауссовских моделей // Информационно-технологический вестник, 2018. № 4 (18). С.3-12.
2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Измерение информационных параметров сигнала в условиях воздействия аддитивных негауссовских коррелированных помех // Автометрия, 2016. Т. 52. № 6. С. 22-28.
3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка информационных параметров сигнала на фоне аддитивно-мультипликативных помех с произвольным распределением // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2018. Т. 21. № 4. С.58-62.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Преобразование негауссовских случайных процессов, сигналов и помех в дифференцируемых системах методом кумулянтных функций // Радиотехника, 2018. № 6. С. 149-155.
5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Применение метода статистической линеаризации для описания сигналов и помех с негауссовским характером распределения // Радиотехника, 2019. № 1. С. 34-43.
6. Дороднов А.А., Чебдаров Ш.М. О полноте систем гауссовых функций и полигауссовых приложениях в статистической радиотехнике // Радиотехника, 1975. № 7.
7. Исаенко О.К., Урбах В.Ю. Разделение смесей распределений вероятностей на их составляющие // Теория вероятностей, математическая статистика, теоретическая кибернетика, 1975. Т. 13.
8. Козин И.В. Элементы теории оптимального обнаружения и приема сигналов // Л.: Изд-во ЛГУ, 1974.
9. Кузнецов В.П., Чураков Е.П. Метод полигауссовской аппроксимации в задаче построения оптимальной дискретной системы // Автоматика и телемеханика. 1975. №9.
10. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов // М.: Наука, 1974.
11. Миленький А.В. Классификация сигналов в условиях неопределенности // М.: Сов. Радио, 1975.
12. Чебдаров Ш.М., Трофимов А.Т. Полигауссовы представления произвольных помех и прием дискретных сигналов // Радиотехника и электроника, 1975. № 4.
13. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов // М.: Сов. Радио, 1974.

УДК 629.7: 608.4

Гарантированные величины – основа анализа качества единичных изделий ракетно – космической техники

Д.Н. Калачева, аспирант третьего года обучения
кафедры управления качеством и стандартизации,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Рассматриваются основные особенности и правила использования гарантированных величин при анализе качества изделий ракетно – космической техники. Приводится определение гарантированной величины и формы ее представления. Показано, что гарантированная величина является распределенной и характеризуется частотным законом распределения. Основными методами представления и преобразования гарантированных величин являются статистические. Приведены примеры определения основных характеристик гарантированных величин.

Анализ качества, гарантированные величины, неопределенность, уравнения качества, единичные объекты, ракетно – космическая техника.

Guaranteed values – the basis of the analysis of the quality of individual products

D.N. Kalacheva, graduate third year of the the
Department of Quality Management and Standardization
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

Herein, the main features and rules of using guaranteed values when analyzing the quality of rocket - space equipment products are considered. The definition of the guaranteed value and the form of its presentation is given. It is indicated that guaranteed value is distributed and is characterized by the frequency distribution law. The main methods of representation and conversion of guaranteed values are statistical. Examples of determining the basic characteristics of guaranteed values are given.

Analysis of the quality, guaranteed values, uncertainty, quality equations, individual objects, rocket – space equipment.

Качество – одно из важнейших понятий современного этапа развития. Успех любого предприятия, любой организации зависит, прежде всего, от качества производимой продукции или оказываемой услуги. Это особенно важно для наукоемких образцов продукции и в первую очередь для агрегатов и существующих и перспективных систем ракетно-космической техники. Если произво-

дитель не может обеспечить требуемый уровень качества, он обречен. А для ракетно-космической отрасли отсутствие качества её продукции приводит к повышению аварийности техники, огромным страховым выплатам и потере контрактов. Поэтому вопросы обеспечения необходимого качества являются первостепенными при организации деятельности космической отрасли.

Существующая наука гарантируетность оценок качества позволяет обеспечить только с помощью вероятностных методов, базирующихся на использовании обширных, представительных выборок и не применимых к единичным объектам. Для анализа качества единичных объектов ракетно – космической техники предлагается использовать новую, гарантированную методологию, основу которой составляет гарантированные величины. Остановимся на основных особенностях и правилах использования гарантированных величин.

Как известно, в математике все величины делятся на постоянные (неизменные) и переменные (изменяющиеся). В физике эти величины называют статическими и динамическими. Постоянные величины отражают значение интенсивности свойства в некоторый момент времени. Традиционно они отображаются в виде чисел. Переменные величины принимают различные значения в зависимости от значений какой-то другой величины, называемой аргументом. Переменные, динамические величины, определяемые значениями аргументов, называют функциями. Динамические величины, зависящие от времени, обычно называют процессами. В практических задачах встречаются функции, зависящие не только от времени, но и от других аргументов. Например, величина прогиба металлического стержня зависит от его длины, прочность стержня зависит от его состава, температура воздуха может рассматриваться как функция высоты и т.д. В реальной жизни встречаются также функции, зависящие не от одного, а от нескольких аргументов. Так, состояние атмосферы (погода) представляет собой функцию пяти аргументов – температуры, давления, влажности, ветра и времени.

Постоянные величины являются частным случаем соответствующих переменных величин, рассматриваемых в некоторый момент времени или имеющих одно и то же значение, выражаемое одним числом.

Величины приобретают интервальный характер из-за наличия погрешности измерений и представления приближенных величин. Например, проводя измерения, мы не можем абсолютно точно, точно, определить действительное значение, а можем только указать интервал, в пределах которого с определенным уровнем гарантированности может находиться действительное значение интенсивности наблюдаемого свойства.

Иррациональные результаты вычислений также имеют не точечный, а интервальный характер. Гарантированные интервальные величины могут быть постоянными (статическими) и переменными (динамическими) (рисунок 1). Остановимся на каждом виде этих величин.

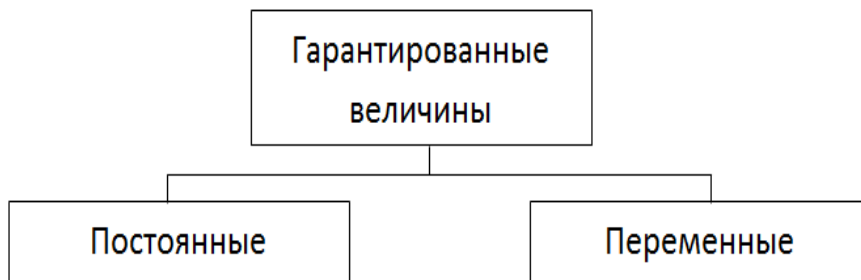


Рисунок 1 – Основные виды гарантированных величин

Под постоянной гарантированной величиной следует понимать величину, действительное значение которой с гарантированностью P_{Δ} находится в рамках интервала $\Delta = [x^H, x^B]$:

$$x^* \equiv \{ [x^H, x^B], P_{\Delta} \} \equiv \{ x, \Delta, P_{\Delta} \}, \quad (1)$$

Где, x – оценка (например, результат измерения) действительного значения x^* .

Постоянные гарантированные величины определяются тремя числами и могут представляться в двух эквивалентных формах. Имея такое представление, можно гарантировать, что действительное значение рассматриваемой величины с гарантированностью P_{Δ} лежит в интервале $\Delta = [x^H, x^B]$. Такое представление применимо для всех видов количественных данных, встречающихся на практике. Для вероятностной или статистической совокупности эти данные определены в процессе вычислений (обработки), а для результатов измерений они получены на основе характеристик использованных метрологических средств. Привычные точечные количественные данные являются частным случаем интервального гарантированного представления, когда величина интервала неопределенности равна нулю ($\Delta=0$), а гарантированность P_{Δ} равна единице.

Чтобы получить гарантированную величину, нужно, прежде всего, определиться с уровнем гарантированности (а, следовательно, и с уровнем риска), который является первостепенным для всех последующих расчетов: для достижения необходимого уровня гарантированности итогового результата уровни гарантированности элементов, определяющих этот результат, должны иметь вполне конкретные значения. При имеющейся статистической выборке уровень гарантированности P_{Δ} находится из закона распределения рассматриваемой величины. Как известно, вероятность нахождения действительного значения в интервале $[y^H, y^B]$ равна приращению функции распределения $F(y)$ на этом интервале:

$$P_{\Delta} = F(y^B) - F(y^H)$$

или интегралу от плотности вероятности $f(y)$:

$$P_{\Delta} = \int_{y^H}^{y^B} f(y) dy.$$

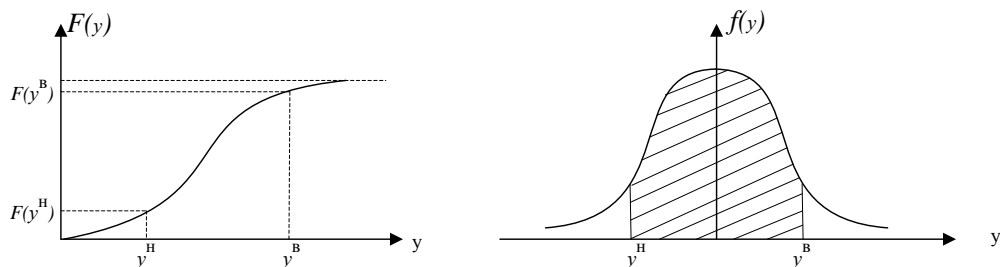


Рисунок 2 – К определению уровня гарантированности P_{Δ}

Для результатов измерений уровень гарантированности находится из закона распределения погрешности: принимая результат измерения за наиболее вероятное значение в рамках метрологического интервала неопределенности, мы получаем возможность представить действительное значение как гарантированную величину. Так, для случая нормального закона распределения погрешности измерений с параметрами m_{Δ} и σ_{Δ} :

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma_{\Delta} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta - m_{\Delta})^2}{2\sigma_{\Delta}^2}}, \quad (2)$$

мы будем иметь следующее гарантированное представление действительного значения y^* :

1. Если нас устраивает уровень гарантированности $P_{\Delta}=0,68$, соответствующий интервалу неопределенности $\Delta=\pm\sigma$, то

$$y^* = \{[y_i - m_{\Delta} - \sigma, y_i - m_{\Delta} + \sigma], 0,68\};$$

2. Если нужно обеспечить уровень гарантированности $P_{\Delta}=0,95$, соответствующий интервалу неопределенности $\Delta=\pm 2\sigma$, то

$$y^* = \{[y_i - m_{\Delta} - 2\sigma, y_i - m_{\Delta} + 2\sigma], 0,95\},$$

и т.д. Для изделий ракетно – космической техники уровень гарантированности P_{Δ} должен быть не менее 0,95.

Переменная гарантированная величина или гарантированная интервальная функция (или просто гарантированная функция) – это функция, действительные значения $x^*(t)$ которой с гарантированностью $P_{\Delta}(t)$ находятся в пределах интервала неопределенности $\Delta(t)$:

$$x^*(t) = \{[x^H(t), x^B(t)], P_{\Delta}(t)\} = \{x(t), \Delta(t), P_{\Delta}(t)\}. \quad (3)$$

Такой вид гарантированная функция имеет при непрерывном наблюдении процесса $x(t)$ (рисунок 2а). При дискретном наблюдении процесса гарантированная функция приобретает вид (рисунок 2б):

$$x(t_j) = \{[x^H(t_j), x^B(t_j)], P_{\Delta}(t_j)\} = \{x(t_j), \Delta(t_j), P_{\Delta}(t_j)\}, \quad (4)$$

где t_j – моменты времени наблюдений.

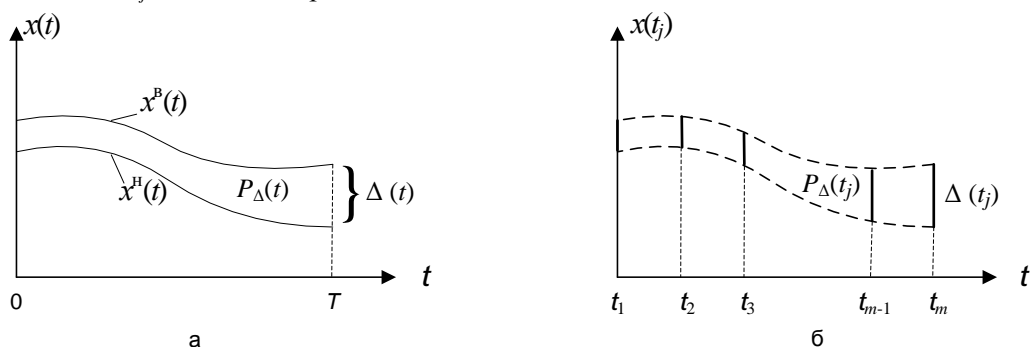


Рисунок 2 – Непрерывные и дискретные гарантированные интервальные функции

Динамические величины отражают изменение интенсивности свойства или связи, сопровождаемое поглощением или выделением энергии. При анализе динамических свойств нужно определять и фиксировать не только интенсивность, но и соответствующие моменты и интервалы времени. Благодаря этому появляется возможность устанавливать время происходящих событий и явлений, определять продолжительность различных этапов, выделять в процессах какие-то важные зоны, например, время нарастания интенсивности свойства, время достижения экстремальных значений и т.п. В отличие от статических характеристик у процессов появляются принципиально новые свойства, например, относительные временные характеристики – скорость и ускорение изменения интенсивности наблюдаемого показателя.

На практике нас интересует вполне определенный уровень гарантированности, который не зависит от времени и от значений рассматриваемых величин. Кроме того, метрологические средства разрабатывают так, что интервал неопределенности и соответствующая величина гарантированности не зависят ни от времени, ни от значений измеряемых величин. Если это сложно обеспечить для всех возможных ситуаций, то их разбивают на вполне определенные условия и диапазоны, в рамках которых добиваются необходимого постоянства значений Δ и P_Δ . Такой подход существенно облегчает практическое использование результатов измерений динамических величин, гарантированные значения которых приобретают вид:

$$x^*(t) = \{ [x^H(t), x^B(t)], P_\Delta \} = \{ x(t), \Delta, P_\Delta \},$$

$$x^*(t_j) = \{ [x^H(t_j), x^B(t_j)], P_\Delta \} = \{ x(t_j), \Delta, P_\Delta \}.$$

Для представления гарантированных функций можно использовать известные аналитические методы аппроксимации и интерполяции, применяя их к верхней и нижней границам интервала неопределенности. Например, известно, что любой процесс $x(t)$ может быть представлен с помощью системы ортонормированных функций $\varphi_i(t)$:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i \varphi_i(t) \quad (5)$$

где $\varphi_i(t)$ ($i=0,1,\dots,\infty$) – система функций, удовлетворяющих условию:

$$\int_0^{\infty} \rho(t) \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j, \\ 0, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \quad (6)$$

$\rho(t)$ – некоторая весовая функция;

α_i – коэффициенты аппроксимации, определяемые по формуле:

$$\alpha_i = \int_0^{\infty} \rho(t) x(t) \varphi_i(t) dt.$$

Аппроксимируя нижнюю $x^H(t)$ и верхнюю $x^B(t)$ границы интервала неопределенности одной и той же системой ортонормированных функций, будем иметь:

$$\Delta(t) = x^B(t) - x^H(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i^B \varphi_i(t) - \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i^H \varphi_i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (\alpha_i^B - \alpha_i^H) \varphi_i(t),$$

где α_i^B и α_i^H – коэффициенты аппроксимации, определяемые по формулам:

$$\alpha_i^B = \int_0^{\infty} \rho(t) x^B(t) \varphi_i(t) dt,$$

$$\alpha_i^H = \int_0^{\infty} \rho(t) x^H(t) \varphi_i(t) dt.$$

В этом случае гарантированные интервальные функции приобретают вид:

$$x^*(t) = \left\{ \left[\sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i^H \varphi_i(t), \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i^B \varphi_i(t) \right], P_{\Delta} \right\} = \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i \varphi_i(t), \sum_{i=0}^{\infty} (\alpha_i^B - \alpha_i^H) \varphi_i(t), P_{\Delta} \right\}.$$

В качестве системы ортонормированных функций могут использоваться различные системы полиномов, например, полиномы Чебышева, Якоби, Лагерра и др., системы гармонических функций Фурье и т.д. Наиболее часто применяют представление функций в виде ряда Тейлора, которое в последующем мы также будем использовать:

$$x(t) = x(t_0) + [x(t) - x(t_0)] \frac{\partial x(t)}{\partial t} \Big|_{x(t_0)} + \frac{1}{2} [x(t) - x(t_0)]^2 \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} \Big|_{x(t_0)} + \dots \quad (7)$$

В большинстве практических случаев гарантированные величины являются исходными данными, необходимыми для расчета других величин, связанных с исходными величинами определенной функциональной или операторной зависимостью $y = \varphi(x)$. В этом случае нужно определить гарантированные значения величины y по гарантированным значениям величины x . Подобные задачи возникают при вычислении значений величин по результатам косвенных измерений.

Основная идея при преобразованиях гарантированных величин заключается в доопределении и последующем преобразовании предполагаемых частотных законов распределения количественных результатов. Для этого результат измерения с учетом систематической ошибки представляется в виде номинального значения измеренной величины. Из-за метрологической погрешности измеряемая величина приобретает характер гарантированной величины. Возможные значения этой величины в рамках интервала неопределенности могут быть распределены в соответствии с законом распределения погрешности используемого измерительного средства. Если, например, закон распределения погрешности является нормальным с параметрами m_Δ и σ_Δ , то результат измерения x_i представляется как величина, распределенная по нормальному закону с параметрами:

$$\begin{aligned}
 m_x &= x_i - m_\Delta, \\
 \sigma_x &= \sigma_\Delta: \\
 f(x) &= \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Следует еще раз подчеркнуть, что такое представление является формальным: оно не свидетельствует о вероятностной природе величины, измеренной лишь один раз, но дает возможность при преобразовании результатов измерений использовать хорошо разработанный математический аппарат теории вероятностей и правильно оценивать степень неопределенности рассчитываемых величин.

Продемонстрируем основные правила преобразований гарантированных интервальных величин. Вначале рассмотрим постоянные гарантированные величины.

Имеется исходная гарантированная величина x^* :

$$x^* = \{x, \Delta, P_\Delta\}.$$

Требуется определить гарантированную величину y^* , связанную с величиной x^* функциональной зависимостью $y^* = \varphi(x^*)$.

Для решения этой задачи в общем случае нужно знать закон распределения $f(x)$. Если имеется статистическая совокупность n значений x_i (множество результатов измерений, объединенных в единую статистическую выборку), то закон распределения $f(x)$ непосредственно известен. Если же имеется только единственный результат измерения x_i , закон распределения $f(x)$ необходимо доопределить. В этом случае вначале нужно определить номинальное значение m_x действительной величины x^* на основе результата измерения x_i и систематиче-

ской погрешности m_{Δ} :

$$m_x = x_i - m_{\Delta}. \quad (9)$$

В этом случае закон распределения исходной величины обусловлен законом распределения погрешности измерений, в котором величина m_{Δ} заменена величиной m_x . Формальность этой замены заключается в том, что мы знаем только одно значение результата измерения. Последующие результаты измерений могут быть близкими к значению x_i , их можно объединить в единую статистическую выборку и определить действительный закон распределения $f(x)$. Но результаты измерений могут и не объединяться в статистическую выборку. На данном этапе мы решаем только одну задачу: нам нужно правильно определить интервал неопределенности и уровень гарантированности величины y .

При определении гарантированных величин, получаемых в результате функциональных преобразований исходных гарантированных величин, можно использовать хорошо разработанный аппарат теории вероятностей и математической статистики, дополняя его необходимыми процедурами. Покажем, как это делается.

Как известно, для определения закона распределения $f(y)$ при любых видах функциональных преобразований $y = \varphi(x)$ необходимо использовать понятие обратной функции:

$$x = \psi(y), \quad (10)$$

где ψ – функция, обратная функции φ .

При монотонной функциональной зависимости $y = \varphi(x)$ плотность распределения обратной функции определяется по формуле:

$$f(y) = f \left\{ \left| \frac{d\psi}{dy} \right| \psi(y) \right\}, \quad (11)$$

где $\left| \frac{d\psi}{dy} \right|$ – модуль производной обратной функции,

а функция распределения:

$$F(y) = \int_{-\infty}^{\psi(y)} f(x) dx. \quad (12)$$

При немонотонной функциональной зависимости $y = \varphi(x)$ (рисунок 3) для определения закона распределения величины y эту функциональную зависимость необходимо предварительно разбить на участки монотонности, а затем к каждому из них применить те же самые формулы.

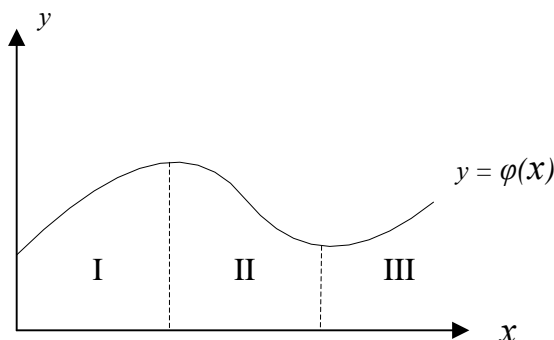


Рисунок 3 – Немонотонная функциональная зависимость

По известному закону распределения для заданного уровня гарантированности P_{Δ} определяем гарантированную величину y^* :

$$y^* = \{[y^H, y^B], P_{\Delta}\}.$$

Поясним применение рассматриваемого метода на конкретном примере. Пусть имеется гарантированная величина x^* :

$$x^* = \{[x^H, x^B], 0,95\},$$

характеризуемая нормальным (реальным или доопределенным) законом распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}},$$

а функциональная зависимость $y = \varphi(x)$ имеет вид:

$$y = ax + b.$$

Требуется определить гарантированную величину y .

В этом случае:

$$\psi(y) = \frac{y-b}{a},$$

$$\left| \frac{d\psi}{dy} \right| = \frac{1}{|a|},$$

$$f(y) = f\left[\psi(y) \left| \frac{d\psi}{dy} \right| \right] = \frac{1}{|a|} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{y-b}{a} - m_x\right)^2}{2\sigma_x^2}},$$

$$f(y) = \frac{1}{|a| \sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[y - (am_x + b)]^2}{2a^2 \sigma_x^2}\right\}. \quad (13)$$

Как видим, величина y имеет нормальную плотность распределения с па-

раметрами:

$$m_y = am_x + b,$$

$$\sigma_y = |a|\sigma_x.$$

Для уровня гарантированности 0,95 величина интервала неопределенности Δ равна $\pm 2\sigma_y$. Следовательно, гарантированная величина y^* будет иметь вид:

$$y^* = \{[m_y - 2\sigma_y; m_y + 2\sigma_y], 0,95\},$$

или

$$y^* = \{[am_x + b - 2|a|\sigma_x; am_x + b + 2|a|\sigma_x], 0,95\}.$$

Нормальный закон распределения для результатов измерений имеет особое значение. Дело в том, что метрологические средства разрабатываются так, что плотность распределения их погрешностей близка к нормальной и обычно представляется двумя величинами – математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением. При известном математическом ожидании погрешности измерительное средство центрируется, т.е. результат измерения не содержит систематической ошибки ($m_\Delta=0$). Результаты измерений как гарантированные интервальные величины характеризуются нормальным законом распределения, при котором вероятность нахождения действительного значения в интервале $[x^H, x^B]$ определяется через функцию Лапласа:

$$P\{x^* \in [x^H, x^B]\} = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{x^B - m_x}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x^H - m_x}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right], \quad (14)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x^2} e^{-t^2} dt.$$

Значения функции Лапласа подробно табулированы и легко определяются из хорошо известных таблиц. Вероятность нахождения действительного значения в пределах симметричного интервала неопределенности $\Delta=2\ell$ определяется по формуле:

$$P(m_x - \ell \leq x^* \leq m_x + \ell) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{\ell}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-\ell}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (15)$$

Вероятность нахождения данного значения в интервалах, кратных σ , $-|x - m_x| \leq k\sigma$ для $k = 1, 2, 3, 4, 5$:

$$P(|x - m_x| \leq \sigma) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \right] = 0,6827;$$

$$P(|x - m_x| \leq 2\sigma) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{2}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(-\frac{2}{\sqrt{2}}\right) \right] = 0,9545;$$

$$P(|x - m_x| \leq 3\sigma) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(-\frac{3}{\sqrt{2}}\right) \right] = 0,9973;$$

$$P(|x - m_x| \leq 4\sigma) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{4}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(-\frac{4}{\sqrt{2}}\right) \right] = 0,99994;$$

$$P(|x - m_x| \leq 5\sigma) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{5}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(-\frac{5}{\sqrt{2}}\right) \right] = 0,99999994.$$

Нормальный закон обладает замечательным свойством – он сохраняет свой вид при линейных преобразованиях. В связи с этим часто очень важно нелинейное преобразование заменить некоторым линейным приближением – линеаризовать на некотором участке (α, β) (рис. 4).

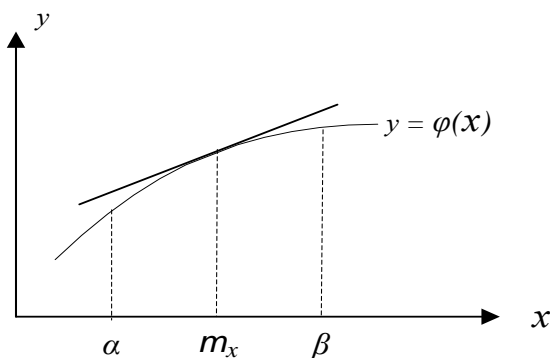


Рисунок 4 – Линеаризация функции $\varphi(x)$

Заменяя нелинейную зависимость $y = \varphi(x)$ на уравнение касательной к этой кривой в точке m_x , будем иметь:

$$y = \varphi(m_x) + \varphi'(m_x) (x - m_x).$$

Для линейной функции можно достаточно просто получить ее числовые характеристики через характеристики исходной величины. В частности, математическое ожидание функции

$$m_y = \varphi(m_x), \tag{16}$$

а среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_y = |\varphi'(m_x)| \sigma_x. \tag{17}$$

Для нормально распределенных гарантированных величин этих характеристик достаточно для определения линейно преобразованных величин.

На практике достаточно распространенной является ситуация, когда интересующая нас величина y определяется по результатам измерений нескольких исходных величин, т.е. функциональная зависимость $y = \varphi(x)$ приобретает вид:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n). \tag{18}$$

В этом случае формулы для определения законов распределения величины y выражаются через модуль якобиана преобразования величин y и x . Так,

плотность распределения величины y приобретает вид:

$$f(y) = f\{|D_n| \psi(y_1, y_2, \dots, y_n)\},$$

где $|D_n|$ – якобиан преобразования величин x_1, x_2, \dots, x_n в величины y_1, y_2, \dots, y_n :

$$\left| D_n = \frac{\partial \psi(y_1, y_2, \dots, y_n)}{\partial (y_1, y_2, \dots, y_n)} \right|.$$

Очень часто нелинейные преобразования $y = \varphi(x)$ законов распределений оказываются громоздкими, трудоемкими и неудобными для практического использования. В этом случае целесообразно использовать приближенные методы определения гарантированных интервальных величин. Один из наиболее удобных методов решения этой задачи основан на разложении нелинейной функции в ряд Тейлора в окрестности результата измерения m_x :

$$y = \varphi(x) = \varphi(m_x) + \varphi'(m_x)(x - m_x) + \frac{1}{2} \varphi''(m_x)(x - m_x)^2 + \dots \quad (19)$$

Ограничимся приближенным представлением функции, например тремя членами ряда Тейлора, и выразим числовые вероятностные характеристики величины y через центральные моменты гарантированной величины:

$$m_y = \varphi(m_x) + \varphi''(m_x)(x - m_x)^2 = \varphi(m_x) + \frac{1}{2} \varphi''(m_x) D_x; \quad (20)$$

$$D_y = [\varphi'(m_x)]^2 D_x + \frac{1}{4} [\varphi''(m_x)]^2 (\mu_4(x) - D_x^2) + \varphi'(m_x) \varphi''(m_x) \mu_3(x), \quad (21)$$

где $\mu_3(x)$ и $\mu_4(x)$ – третий и четвертый центральные моменты величины x .

Значения двух последних слагаемых в формуле для D_y показывают, насколько важно учитывать характер нелинейности функциональной зависимости: если значения этих слагаемых незначительно отражаются на величине D_y , можно обойтись линейризованным представлением функции двумя членами аппроксимирующего ряда.

На практике законы распределения погрешности измерений, как правило, близки к нормальным и представляются значениями m_x и D_x . При нормальном законе распределения

$$\mu_3(x) = 0, \quad \mu_4(x) = 3D_x^2$$

а формула принимает вид:

$$D_y = [\varphi'(m_x)]^2 D_x + \frac{1}{2} [\varphi''(m_x)]^2 D_x^2.$$

Зная значения m_y и D_y , можно определить гарантированные значения y^* :

$$y^* = \{[m_y - 2\sigma_y \leq y \leq m_y + 2\sigma_y], 0,95\},$$

где σ_y – среднеквадратическое значение y :

$$\sigma_y = \left\{ [\varphi'(m_x)]^2 D_x + \frac{1}{2} [\varphi''(m_x)]^2 D_x^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Если значения рассматриваемого показателя являются функцией нескольких аргументов

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

то метод определения гарантированных значений функции остается аналогичным. Представляя функцию тремя членами ряда Тейлора в окрестности точки $m = \{m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}\}$, образованной результатами измерений, будем иметь:

$$y \approx \varphi(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m (x_i - m_{xi}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m (x_i - m_{xi})^2 + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m (x_i - m_{xi})(x_j - m_{xj}), \quad (22)$$

где индекс m означает, что в выражение частной производной вместо аргументов x_i подставлены результаты измерений;

символ $i < j$ определяет суммирование всех сочетаний i и j .

Математическое ожидание этой функции равно:

$$m_y \approx \varphi(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m D_{xi} + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m K_{ij}, \quad (23)$$

где K_{ij} – корреляционный момент величин x_i и x_j .

Дисперсия соотношения (2.22) имеет вид:

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m^2 (\mu_4(x_i) - D_{xi}^2) + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m^2 D_{xi} D_{xj} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m \mu_3(x_i). \quad (24)$$

В наиболее важном для практики случае, когда законы распределения погрешностей измерительных средств представляются нормальными, а значения x_1, x_2, \dots, x_n некоррелированы, соотношения для m_y и D_y будут иметь вид:

$$m_y = \varphi(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m D_{xi}, \quad (25)$$

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m D_{xi}^2 + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m D_{xi} D_{xj}. \quad (26)$$

Если функциональная зависимость $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ является линейной или линеаризованной, то последние формулы приобретают наиболее простой вид:

$$m_y = \varphi(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}), \quad (27)$$

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi}. \quad (28)$$

Гарантированное интервальное значение функции определяется соотношением:

$$y^* = \{[m_y - k\sigma_y, m_y + k\sigma_y], P_{k\sigma}\}.$$

Таким образом, зная значения исходной гарантированной величины, можно определить значения функции от этой величины.

Использование гарантированных величин не требует получения статистической выборки данных и применимо к единичным изделиям. Особенно важно это становится в ракетно – космической отрасли, где требуется обеспечивать качество каждого отдельного образца.

Литература

1. Васильев Н.А. Теория управления социально-экономическими системами // Королев, Моск. обл., Королевский институт управления, экономики и социологии. 2010. 251 с.
2. Гегель Г.Ф. В. Сочинения в 10 томах, Т.5 // М.: Философская мысль, 1937. 453 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь // ИПК Издательство стандартов, 2001. 68 с.
4. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования.
5. ГОСТ Р ИСО 9004-2001. Системы менеджмента качества Рекомендации по улучшению деятельности.
6. Исаев В.Г. О методическом подходе к оценке технического уровня агрегатов и систем космических ракетных комплексов // Информационно-технологический вестник, № 2(04). 2015. 136с. С. 106-110.
7. Исаев В.Г., Озерский М.Д. Основные направления создания отечественных многоазовых космических систем // Информационно-технологический вестник, № 1(01). 2014. 103с. С.34-43.
8. Исаев В.Г., Озерский М.Д. Состояние и перспективы развития отечественной системы средств выведения космических аппаратов // Информационно-технологический вестник, № 2(02). 2014. 140с. С.54-62.
9. Фейгенбаум А. Контроль качества продукции // М.: Экономика, 1986.

УДК 629.7

Модель и алгоритм иерархического контроля технических параметров автоматических космических аппаратов при автономных и комплексных испытаниях

В.М. Макаров, кандидат технических наук, главный специалист,
Департамент автоматических комплексов и систем специального назначения,
Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»,
г. Москва

Рассматривается задача рационального статистического контроля технических параметров автоматических космических аппаратов (АКА) в процессе их наземной отработки при автономных и комплексных испытаниях в трехуровневой иерархической структуре: автономные испытания изделий, автономные испытания систем и комплексные испытания АКА в целом. Приводится математическая модель контроля, формализованная постановка задачи и алгоритм оптимизации статистического контроля совокупностей изделий и их технических параметров по иерархии отработки. При этом модель и алгоритм позволяют выбрать оптимальную номенклатуру изделий каждого уровня иерархии из совокупностей, подлежащих обязательному контролю, учесть заданные требования к техническим параметрам и результаты контроля технических параметров изделий нижних уровней при планировании и проведении контроля параметров изделий более высоких уровней.

Иерархия, изделие, контроль, оптимизация, параметры, планирование, риски 1 и 2 рода, совокупность, требования, целевая функция, экономические потери, экономические затраты.

Model and algorithm of hierarchical control of technical parameters of automatic spacecrafts at autonomous and complex tests

V.M. Makarov, PhD in Engineering sciences; chief specialist
Of Department of automated systems and special purpose systems,
Space agency of the Russian Federation, Moscow

We consider the problem of rational statistical control technical parameters of automatic spacecraft (AKA) in the process of their ground testing in autonomous and complex testing in a three-tier hierarchical structure: independent product testing, independent testing systems and comprehensive testing of the AKA in general. The mathematical model of control, the formalized statement of a problem and algorithm of optimization of statistical control of sets of products and their technical parameters on hierarchy of working off is given. At the same time, the model and algorithm allow you to select the optimal product range of each level of the hierarchy from the sets that are subject to mandatory control, take into account the specified requirements for tech-

nical parameters and the results of monitoring the technical parameters of the lower levels of products when planning and carrying out control of the parameters of the higher levels.

Hierarchy, product, control, optimization, parameters, planning, risks of the 1st and 2nd kind, aggregate, requirements, objective function, economic losses, economic costs.

В работе [1] были рассмотрены отработочные испытания электронных элементов и сложных изделий АКА, которые в общем случае включают в себя лабораторно-отработочные испытания (ЛОИ), конструкторско-доводочные испытания (КДИ), ресурсные испытания (РИ), типовые испытания (ТИ) и другие виды испытаний. При этом полученные результаты исследований позволяют непосредственно перейти к постановке и решению другой важной задачи оптимизации планирования и проведения наземной отработки АКА, которая, в основном, относится к сфере приемо-сдаточных испытаний.

Одной из важнейших целей процесса наземной отработки является контроль и обеспечение заданных требований к техническим параметрам АКА, заданным в документации, которые характеризуют его способность выполнять в полном объеме требуемые функции в установленных режимах и условиях применения в течение определенного времени или наработки.

Этап наземной отработки состоит из наземных автономных испытаний изделий и систем на специальных стендах и наземных комплексных испытаний АКА в целом. При этом процесс наземной отработки включает в себя большое число различного вида разнородных испытаний, занимает большую продолжительность во времени и требует значительных экономических затрат.

Наземные автономные испытания (АИ) изделий АКА предназначены для проверки на специальных стендах правильности принятых проектных, схемно-конструктивных, технологических решений и соответствия заданным в документации требованиям к техническим параметрам. При этом определяются запасы работоспособности изделий, выявляются дефекты конструкторского и производственного характера, обрабатывается конструкторско-технологическая документация.

Наземные автономные испытания систем АКА, как более высокого иерархического уровня, проводятся с целью отработки функционирования всего комплекса систем, узлов и агрегатов и определения его соответствия требованиям документации. Их проводят с использованием натуральных масштабных и полноразмерных стендов и моделей (полноразмерные модели системы управления (СУ), стенды отработки программ и алгоритмов для бортовых и наземных вычислительных средств другие), предназначенных для отработки в условиях, близких к реальным.

Основным содержанием наземных комплексных испытаний АКА в целом является проверка соответствия технических параметров заданным требованиям при совместной работе всех систем, выявление и устранение дефектов на стыках изделий, приборов, агрегатов и систем.

При проведении испытаний изделий, систем и АКА в целом в процессе

наземной отработки могут выявляться несоответствия требованиям, изложенным в документации, а также отказы (неисправности), как конструктивного, так и производственного характера, влияющие на применение по назначению. Из состояния несоответствия заданным требованиям изделия, системы и АКА в целом могут быть выведены только в результате проведения технического воздействия (доработки). При возникновении потребности в техническом воздействии испытания прекращаются, осуществляется поиск причин возникновения неисправностей и отказов, определяется объем работ для восстановления соответствия параметров требованиям и организуется их выполнение. После завершения технического воздействия испытания продолжают. Очевидно, что возникновение потребности в техническом воздействии (доработке) является всегда неплановым и представляет собой механизм управления техническими параметрами соответствующих технических объектов: изделий, систем и АКА в целом. Таким образом, механизм управления реализуется по результатам контроля параметров при испытаниях, в основном, посредством проведения доработок в широком смысле этого слова.

Учитывая все изложенное, для разработки математической модели иерархического контроля будем рассматривать трехуровневую иерархическую структуру наземной отработки: автономные испытания изделий АКА, автономные испытания систем АКА и комплексные испытания АКА в целом. При этом будем рассматривать наиболее общий случай, когда при автономных испытаниях изделий и систем АКА проводится контроль совокупностей разных изделий, относящихся к этим уровням иерархии. При комплексных испытаниях АКА в целом проводится контроль технических параметров одного АКА, который комплектуется из совокупностей этих изделий и систем, принятых для дальнейшего использования по результатам испытаний.

С учетом изложенного схему статистического контроля технических параметров автоматических космических аппаратов (АКА) в трехуровневой иерархической структуре в общем виде можно представить следующим образом.

Из совокупности изделий АКА, размера M_i , на этапе их автономных испытаний извлекается некоторая выборка (номенклатура) изделий $x_i \leq M_i$ и проводится контроль их технических параметров. Далее, на последующем этапе автономных испытаний систем АКА из совокупности систем, размера M_c , также извлекается некоторая выборка (номенклатура) систем $x_c \leq M_c$ и проводится контроль их технических параметров. В обоих случаях контроля параметры считаются независимыми. В частных случаях размер выборки (номенклатуры) может совпадать с размером совокупности, что поглощается решением задачи.

На последнем этапе комплексных испытаний АКА в целом проводится (в общем случае) контроль выборки (номенклатуры) $x_{пка} \leq N_{пка}$ его технических параметров из общего числа $N_{пка}$ независимых параметров АКА. Случай контроля всех технических параметров АКА также поглощается решением задачи.

При такой схеме статистического контроля имеет место следующая специфика, которую не позволяют учесть существующие методы статистического контроля [1].

Для конкретного изделия (системы) АКА при их автономных испытаниях [2]:

на каждый технический параметр изделия в документации заданы допуски;

при контроле каждого параметра возникают вероятностные ошибки, в результате которых годный параметр (находящийся в пределах допуска) можно принять за дефектный (вышедший за пределы допуска), а дефектный – за годный. Эти ошибки обусловлены ограниченной точностью и погрешностями средств измерения, т.е. контроль не является абсолютно достоверным;

при контроле определенной номенклатуры технических параметров изделия также возникают ошибки, которые относятся уже к изделию в целом (случай контроля всех параметров изделия поглощается решением задачи);

Для совокупности разных изделий АКА при автономных испытаниях:

при контроле определенной номенклатуры изделий АКА из их совокупности также возникают вероятностные ошибки, которые связаны с ошибками при контроле каждого изделия, а также с тем, что проводится контроль не всей совокупности изделий, а определенной номенклатуры изделий из этой совокупности (случай контроля партии одинаковых изделий является частным случаем, когда совокупность состоит из одинаковых изделий);

Для совокупности разных систем АКА при автономных испытаниях:

при контроле определенной номенклатуры систем АКА из их совокупности также возникают вероятностные ошибки, которые связаны с ошибками при контроле предыдущей совокупности изделий АКА, а также с тем, что проводится контроль не всей совокупности систем, а определенной номенклатуры систем из этой совокупности (случай контроля партии одинаковых систем также является частным случаем, когда совокупность состоит из одинаковых систем АКА);

Для наземных комплексных испытаний АКА в целом [2]:

на каждый технический параметр АКА в целом, который является самым высоким уровнем иерархии, также в документации заданы допуски;

при контроле каждого параметра АКА также возникают вероятностные ошибки, в результате которых годный параметр (находящийся в пределах допуска) можно принять за дефектный (вышедший за пределы допуска), а дефектный – за годный. Природа этих ошибок аналогична той, о которой говорилось выше;

при контроле определенной номенклатуры параметров АКА также возникают ошибки, которые относятся уже к АКА в целом (случай контроля всех параметров поглощается решением задачи) и которые связаны с ошибками при контроле предыдущих совокупностей изделий и систем АКА на этапах их автономных испытаний.

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия вероятностных ошибок: ошибки при контроле технических параметров каждого изделия и системы АКА при их автономных испытаниях, ошибки при контроле определенной номенклатуры изделий и систем АКА из их совокупностей и ошибки при контроле параметров АКА в целом. Вероятности этих ошибок характеризуются соответствующими безусловными рисками 1 и 2 рода, $\alpha_i, \beta_i, \alpha_c, \beta_c, \alpha_{ci}, \beta_{ci}, \alpha_{cc}, \beta_{cc}, \alpha_{ca}, \beta_{ca}$, соответственно.

В результате проведенных исследований на основе использования аппарата алгебры событий разработаны математические зависимости для определения этих рисков, которые имеют следующий вид.

Для конкретного изделия АКА при автономных испытаниях [1,2,4]:

$$\alpha_{и} = \prod_{j=1}^{N_{пн}} \frac{\alpha_{пји}}{\alpha_{yjи}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{пн}} (1 - \alpha_{yjи}) \right], \quad (1)$$

$$\beta_{и} = \prod_{j=1}^{x_{пн}} \left[\frac{\alpha_{пји}}{\alpha_{yjи}} (1 - \alpha_{yjи}) + \beta_{пји} \right] - \prod_{j=1}^{N_{пн}} \frac{\alpha_{пји}}{\alpha_{yjи}} \prod_{j=1}^{x_{пн}} (1 - \alpha_{yjи}), \quad (2)$$

Для конкретной системы АКА при автономных испытаниях [1,2,4]:

$$\alpha_{с} = \prod_{j=1}^{N_{пс}} \frac{\alpha_{пјс}}{\alpha_{yjс}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{пс}} (1 - \alpha_{yjс}) \right], \quad (3)$$

$$\beta_{с} = \prod_{j=1}^{x_{пс}} \left[\frac{\alpha_{пјс}}{\alpha_{yjс}} (1 - \alpha_{yjс}) + \beta_{пјс} \right] - \prod_{j=1}^{N_{пс}} \frac{\alpha_{пјс}}{\alpha_{yjс}} \prod_{j=1}^{x_{пс}} (1 - \alpha_{yjс}), \quad (4)$$

Для совокупности разных изделий АКА при автономных испытаниях [1]:

$$\alpha_{си} = \prod_{i=1}^{M_{и}} \frac{\alpha_{иси}}{\alpha_{yiси}} \left[1 - \prod_{i=1}^{x_{и}} (1 - \alpha_{yiси}) \right], \quad (5)$$

$$\beta_{си} = \prod_{i=1}^{x_{си}} \left[\frac{\alpha_{иси}}{\alpha_{yiси}} (1 - \alpha_{yiси}) + \beta_{иси} \right] - \prod_{i=1}^{M_{и}} \frac{\alpha_{иси}}{\alpha_{yiси}} \prod_{i=1}^{x_{си}} (1 - \alpha_{yiси}), \quad (6)$$

Для совокупности разных систем АКА при автономных испытаниях [1]:

$$\alpha_{сс} = \prod_{i=1}^{M_{с}} \frac{\alpha_{исс}}{\alpha_{yисс}} \left[1 - \prod_{i=1}^{x_{с}} (1 - \alpha_{yисс}) \right], \quad (7)$$

$$\beta_{сс} = \prod_{i=1}^{x_{с}} \left[\frac{\alpha_{исс}}{\alpha_{yисс}} (1 - \alpha_{yисс}) + \beta_{исс} \right] - \prod_{i=1}^{M_{с}} \frac{\alpha_{исс}}{\alpha_{yисс}} \prod_{i=1}^{x_{с}} (1 - \alpha_{yисс}), \quad (8)$$

Для наземных комплексных испытаний АКА в целом [1,2]:

$$\alpha_{ка} = \prod_{j=1}^{N_{пка}} \frac{\alpha_{јпка}}{\alpha_{yjпка}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{пка}} (1 - \alpha_{yjпка}) \right], \quad (9)$$

$$\beta_{ка} = \prod_{j=1}^{x_{пка}} \left[\frac{\alpha_{јпка}}{\alpha_{yjпка}} (1 - \alpha_{yjпка}) + \beta_{јпка} \right] - \prod_{j=1}^{N_{пка}} \frac{\alpha_{јпка}}{\alpha_{yjпка}} \prod_{j=1}^{x_{пка}} (1 - \alpha_{yjпка}), \quad (10)$$

где $\alpha_{пји}$, $\beta_{пји}$, $\alpha_{упји}$, $\alpha_{пјс}$, $\beta_{пјс}$, $\alpha_{упјс}$ – безусловные риски и условные риски, возникающие при контроле j -го параметра изделия и системы при их автономных испытаниях (метрологические риски, которые определяются известными методами метрологии [2,3], исходя из заданных допусков (требований) на каждый параметр и погрешностей средств их измерения);

$N_{пн}$, $x_{пн}$, $N_{пс}$, $x_{пс}$ – общее количество параметров изделия и системы и но-

менклатура контролируемых параметров (текущее значение);

$\alpha_{i\text{си}}, \beta_{i\text{си}}, \alpha_{y_{i\text{си}}}, \alpha_{i\text{сс}}, \beta_{i\text{сс}}, \alpha_{y_{i\text{сс}}}$ – безусловные риски и условные риски, возникающие при контроле i -го изделия и системы из соответствующих совокупностей изделий и систем при их автономных испытаниях (определяются с учетом выражений (1) и (2), (3) и (4));

M_i и x_i – размер совокупности изделий и номенклатура контролируемых изделий (текущее значение) из совокупности;

M_c и x_c – размер совокупности систем и номенклатура контролируемых систем (текущее значение) из совокупности;

$\alpha_{j\text{пка}}, \beta_{j\text{пка}}$, и $\alpha_{y_{j\text{пка}}}$ – безусловные риски и условный риск, возникающие при контроле j -го параметра АКА в целом при наземных комплексных испытаниях (метрологические риски, которые определяются известными методами метрологии, исходя из заданных допусков (требований) на каждый параметр АКА и погрешностей средств их измерения [2,3]);

$N_{\text{пка}}$ и $x_{\text{пка}}$ – общее количество технических параметров АКА в целом и номенклатура (текущее значение) контролируемых параметров АКА при его комплексных испытаниях.

Математические зависимости (1)...(10) получены исходя из следующих определений.

Изделие (система, АКА в целом) является годным, если все технические параметры находятся в пределах заданных допусков. Изделие (система, АКА в целом) является дефектным, если хотя бы один параметр вышел за пределы заданного допуска.

Совокупность изделий (систем) является годной, если годны все изделия (системы) совокупности. Совокупность изделий (систем) является дефектной, если дефектно, хотя бы одно изделие (система) совокупности.

Исследования показали, что в зависимости от изменения переменных x_i , x_c и $x_{\text{пка}}$ соответствующие риски 1 и 2 рода, α и β , изменяются в противоположных направлениях. Кроме того, показано, что, если технические объекты: изделия АКА, системы АКА, их совокупности или АКА в целом не контролируются, то есть принимаются без контроля, либо контроль уже проведен и эти технические объекты уже приняты для проведения дальнейших работ, то с рисками происходит следующее:

1*. Риски 1 рода α становятся равными нулю.

2*. Риски 2 рода β совпадают с вероятностями того, что соответствующие технические объекты являются дефектными, то есть не удовлетворяют заданным требованиям.

Приступим непосредственно к разработке математической модели.

Реализация тех или иных значений рисков при контроле связана с принятием ошибочных решений по его результатам, которые влекут за собой определенные потери. С целью уменьшения этих потерь теоретически обоснованы целевые функции для каждого уровня в трехуровневой иерархической структуре [1]. Целевые функции включают в себя три составляющие: математические ожидания экономических потерь, связанных с рисками 1 и 2 рода, и затраты на контроль. Они имеют следующий вид.

Для этапа автономных испытаний совокупностей разных изделий АКА:

$$C_{си}^{ai} = C_{1си}^{ai} \alpha_{си}^{ai} + C_{2си}^{ai} \beta_{си}^{ai} + \sum_{i=1}^{x_i} C_{1iи}^{ai}, \quad (11)$$

где $C_{1си}^{ai}$ и $C_{2си}^{ai}$ – средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности изделий АКА данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

$C_{1ии}$ – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль i -го изделия совокупности, $i = \overline{1, M_i}$.

Для этапа автономных испытаний совокупностей разных систем АКА:

$$C_{сс}^{ai} = C_{1сс}^{ai} \alpha_{сс}^{ai} + C_{2сс}^{ai} \beta_{сс}^{ai} + \sum_{i=1}^{x_c} C_{1ic}^{ai}, \quad (12)$$

где $C_{1сс}^{ai}$ и $C_{2сс}^{ai}$ – средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности систем АКА данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

C_{1ic} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль i -й системы совокупности, $i = \overline{1, M_c}$.

Для наземных комплексных испытаний АКА в целом:

$$C_{ка}^{ki} = C_{1\alpha}^{ka} \alpha_{ка}^{ki} + C_{1\beta}^{ka} \beta_{ка}^{ki} + \sum_{j=1}^{x_{пка}} C_{1j}, \quad (13)$$

где $C_{1\alpha}^{ka}$ и $C_{1\beta}^{ka}$ – средние экономические потери за счет браковки годного и приемки дефектного АКА, т.е. математические ожидания потерь;

C_{1j} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль j -го параметра АКА в целом.

Будем считать, что номенклатура технических параметров каждого изделия и каждой системы АКА, которые подлежат обязательному контролю, и соответствующие им риски α_i и β_i , α_c и β_c (формулы (1)...(4)) уже определены оптимальным образом на основе процедуры, изложенной в [2,4].

Риски 1 и 2 рода $\alpha_{си}^{ai}$, $\beta_{си}^{ai}$ и $\alpha_{сс}^{ai}$, $\beta_{сс}^{ai}$, входящие в целевые функции (11) и (12) и относящиеся к контролю совокупностей изделий и систем АКА при их автономных испытаниях, являются функциями размеров совокупностей M_i и M_c ; номенклатуры x_i и x_c , изделий и систем, подлежащих обязательному контролю из этих совокупностей; а также рисков 1 и 2 рода α_i , β_i , α_c , β_c , возникающих при контроле каждого изделия и системы.

$$\alpha_{си}^{ai} = \alpha_{си}^{ai}(M_i, x_i, \alpha_i, \beta_i), \quad (14)$$

$$\beta_{си}^{ai} = \beta_{си}^{ai}(M_i, x_i, \alpha_i, \beta_i), \quad (15)$$

$$\alpha_{сс}^{ai} = \alpha_{сс}^{ai}(M_c, x_c, \alpha_c, \beta_c), \quad (16)$$

$$\beta_{сс}^{ai} = \beta_{сс}^{ai}(M_c, x_c, \alpha_c, \beta_c). \quad (17)$$

В свою очередь, риски 1 и 2 рода $\alpha_{ка}^{ki}$ и $\beta_{ка}^{ki}$, входящие в целевую функцию (13) для контроля технических параметров АКА в целом при комплексных испытаниях, являются функциями:

рисков $\alpha_{си}^{ai}$, $\beta_{си}^{ai}$ и $\alpha_{сс}^{ai}$, $\beta_{сс}^{ai}$, относящихся к предшествующему контролю

совокупностей изделий и систем АКА при их автономных испытаниях;
 общего количества технических параметров $N_{\text{пка}}$ АКА в целом;
 номенклатуры параметров $x_{\text{пка}}$, подлежащих обязательному контролю;
 рисков 1 и 2 рода $\alpha_{\text{пка}}$ и $\beta_{\text{пка}}$, возникающих при контроле технических параметров АКА в целом. Последние определяются известными методами метрологии, исходя из заданных допусков (требований) на каждый параметр АКА и погрешностей средств их измерения.

То есть риски $\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}}$ и $\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}}$, которые можно записать в виде следующих функционалов:

$$\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}}(\alpha_{\text{си}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{си}}^{\text{аи}}, \alpha_{\text{сс}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}}, N_{\text{пка}}, x_{\text{пка}}, \alpha_{\text{пжка}}, \beta_{\text{пжка}}), \quad (18)$$

$$\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \beta_{\text{ка}}^{\text{ки}}(\alpha_{\text{си}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{си}}^{\text{аи}}, \alpha_{\text{сс}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}}, N_{\text{пка}}, x_{\text{пка}}, \alpha_{\text{пжка}}, \beta_{\text{пжка}}). \quad (19)$$

Основываясь на выражениях (11)...(13), а также на результатах, полученных в [1], математическую модель и формализованную постановку задачи оптимизации иерархического контроля можно записать так:

Найти вектор

$$\vec{Y} = \left\{ \begin{array}{l} \min C_{\text{ка}}^{\text{ки}}, \quad \min C_{\text{сс}}^{\text{аи}}, \quad \min C_{\text{си}}^{\text{аи}} \\ (x_{\text{пка}}, \alpha_{\text{ка}}, \beta_{\text{ка}}) \quad (x_{\text{с}}, \alpha_{\text{сс}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}}) \quad (x_{\text{и}}, \alpha_{\text{си}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{си}}^{\text{аи}}) \end{array} \right\}, \quad (20)$$

где $C_{\text{си}}^{\text{аи}}, C_{\text{сс}}^{\text{аи}}, C_{\text{ка}}^{\text{ки}}$ – определяются выражениями (11), (12) и (13);
 $\alpha_{\text{си}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{си}}^{\text{аи}}, \alpha_{\text{сс}}^{\text{аи}}, \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}}, \alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}}, \beta_{\text{ка}}^{\text{ки}}$ – определяются выражениями (5)...(10);
 в области, определяемой следующими неравенствами

$$\alpha_{\text{си}}^{\text{аи}} \geq 0, \beta_{\text{си}}^{\text{аи}} > 0; \quad \alpha_{\text{сс}}^{\text{аи}} \geq 0, \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}} > 0; \quad \alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}} \geq 0, \beta_{\text{ка}}^{\text{ки}} > 0, \quad (21)$$

$$0 < x_{\text{и}} \leq M_{\text{и}}; \quad 0 < x_{\text{с}} \leq M_{\text{с}}; \quad 0 < x_{\text{пка}} \leq N_{\text{пка}}, \quad (22)$$

$$i = \overline{1, N_{\text{пка}}}. \quad (23)$$

Для решения задачи иерархического контроля в постановке (20)...(23) проведено исследование свойств целевых функций, которые геометрически представляют собой решетчатые поверхности в многомерном пространстве дискретных переменных. Определены условия существования минимума целевых функций, а также условия целесообразности контроля и условия нецелесообразности проведения контроля совокупностей изделий и систем.

Следует отметить, что полученные математические зависимости (5)...(8) для определения рисков, возникающих при контроле совокупностей изделий и систем АКА, и известные [2,4] зависимости для определения рисков 1 и 2 рода, возникающих при контроле технических параметров изделий или систем (1)...(4), имеют один и тот же аналитический вид. Они отличаются лишь входящими в них конкретными характеристиками. Этот результат позволил значительно упростить исследование свойств целевых функций.

Формализованная постановка задачи (20)...(23) содержит взаимосвязанные функционалы рисков 1 и 2 рода. Поэтому в результате исследований было показано, что ее можно решать поэтапно с учетом иерархии процесса наземной отработки. На первом этапе следует определить оптимальные планы контроля совокупностей разных изделий АКА при их автономных испытаниях, то есть оптимальную номенклатуру изделий, подлежащих обязательному проведению испытаний и контролю их технических параметров и оптимальные риски 1 и 2 рода. Затем, необходимо провести испытания этой номенклатуры изделий по оптимальным планам и по результатам контроля их технических параметров осуществить функцию управления этими параметрами, как было изложено выше. Далее, после успешного завершения АИ изделий с учетом их результатов следует определить оптимальные планы контроля совокупностей разных систем АКА при их АИ, провести по ним испытания и так далее до проведения комплексных испытаний и контроля технических параметров АКА в целом. При этом взаимосвязь между уровнями иерархии выражается через взаимосвязи между апостериорными рисками 1 и 2 рода. Математические зависимости для определения этих рисков разработаны с использованием установленных свойств 1* и 2* и аппарата булевой алгебры в работах [2,4,5]. Показано, что практическое использование апостериорных рисков 1 и 2 рода позволяет последовательно учесть результаты предшествующего контроля нижних уровней в трехуровневой иерархической структуре при оптимизации планов контроля изделий более высокого уровня, несмотря на различие контролируемых технических параметров на уровне изделий, систем и АКА в целом.

Все изложенное позволяет непосредственно перейти к разработке алгоритма оптимизации иерархического контроля технических параметров АКА в процессе наземной отработки. При этом, как и прежде будем считать, что технические параметры изделий и систем АКА, которые подлежат проведению автономных испытаний, уже определены оптимальным образом с использованием процедуры, изложенной в [2,4].

1. Рассматривается самый нижний уровень иерархии АКА, то есть совокупность разных изделий АКА, которые подлежат проведению автономных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, что определить оптимальный план контроля этой совокупности, а именно: оптимальные значения рисков 1 и 2 рода, а также номенклатуру изделий, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры.

Исходными данными для решения задачи оптимизации являются:

M_i – размер совокупности разных изделий АКА;

C_{1ci}^{ai} и C_{2ci}^{ai} – средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности изделий АКА данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

C_{1ici}^{ai} – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль i -го изделия совокупности, $i = \overline{1, M_i}$, (рассчитываются по формулам [2,4] для каждого изделия совокупности);

оптимальные риски 1 и 2 рода α_i^* , β_i^* и $P(A_{ii}) = \frac{\alpha_{ici}}{\alpha_{yici}}$ – вероятность того, что i -ое изделие совокупности является годным, полученные на основе исполь-

зования алгоритма оптимизации контроля технических параметров изделий, разработанного в [2,4] (их количественные значения рассчитываются для всех изделий $i = \overline{1, M_i}$).

По данным значениям уточняется вид целевой функции (11) с использованием выражений для рисков 1 и 2 рода (2) и (3):

$$C_{си}^{ai} = C_{1си}^{ai} \prod_{i=1}^{M_i} P(A_{ii}) \left[1 - \prod_{i=1}^{x_i} (1 - \alpha_{y_{ii}}) \right] + C_{2си}^{ai} \left\{ \prod_{i=1}^{x_i} [P(A_{ii})(1 - \alpha_{y_{ii}}) + \beta_{ii}] - \prod_{i=1}^{M_i} P(A_{ii}) \prod_{i=1}^{x_i} (1 - \alpha_{y_{ii}}) \right\} + \sum_{i=1}^{x_i} C_{1ii}^{ai} \quad (24)$$

Для этой целевой функции, далее, используется выявленное свойство [1], на основании которого можно заключить следующее: чтобы функция (14) имела минимум внутри интервала $0 < x_i < M_i$, должны среди всех M_i независимых изделий совокупности существовать такие x_i изделий, для которых бы выполнялись неравенства:

$$C_{си}^{0ai} > C_{си}^{iai}, \text{ для всех } i = \overline{1, M_i}, \quad (25)$$

где $C_{си}^{0ai}$ – значение целевой функции при $x_i \rightarrow 0$, т.е. когда ни одно изделие из совокупности M_i не контролируется; i – номер контролируемого изделия из совокупности; $C_{си}^{iai}$ – значение целевой функции при контроле только i -го изделия.

Физический смысл неравенств (25) заключается в следующем. Из всей совокупности изделий M_i в число изделий, подлежащих обязательному контролю (проведению соответствующих испытаний и контролю их технических параметров), включаются только те изделия, контроль которых приводят к уменьшению значений целевой функции потерь, по сравнению с ее начальным значением, когда ни одно изделие из совокупности разных изделий M_i не контролируется.

То есть, дальнейшая последовательность действий для оптимального выбора номенклатуры изделий, подлежащих обязательному проведению контроля при автономных испытаниях, состоит в следующем.

3. Вычисляется значение целевой функции $C_{си}^{0ai}$ в точке $x_i \rightarrow 0$, т.е. когда ни одно изделие из M_i изделий не контролируется, по формуле (24), которая принимает вид:

$$C_{си}^{0ai} = C_{2си}^{ai} [1 - \prod_{i=1}^{M_i} P(A_{ii})] \quad (26)$$

4. Определяются значения целевой функции $C_{си}^{1ai}$ для каждого i -го изделия отдельно. Эти значения вычисляются для всей совокупности изделий.

5. Среди всех M_i изделий в число x_i , подлежащих обязательному проведению автономных испытаний, включаются только те изделия, для которых выполняются неравенства (25).

Полученное значение x_i будет оптимальным $x_i = x_i^*$, ему соответствуют оптимальные значения рисков $\alpha_{си}^{*ai}$ и $\beta_{си}^{*ai}$, которые вычисляются на основе (5) и

(6) по формулам:

$$\alpha_{\text{си}}^{*ai} = \prod_{i=1}^{M_i} P(A_{ii}) \left[1 - \prod_{i=1}^{x_i^*} (1 - \alpha_{y_{ii}}) \right], \quad (27)$$

$$\beta_{\text{си}}^{*ai} = \prod_{i=1}^{x_i^*} [P(A_{ii})(1 - \alpha_{y_{ii}}) + \beta_{ii}] - \prod_{i=1}^{M_i} P(A_{ii}) \prod_{i=1}^{x_i^*} (1 - \alpha_{y_{ii}}), \quad (28)$$

Таким образом, в результате получен оптимальный план контроля совокупности разных изделий АКА $(x_i^*, \alpha_{\text{си}}^{*ai}, \beta_{\text{си}}^{*ai}, c = 0)$, где $c = 0$ – приемочное число (контрольный норматив), которое для высоконадежных изделий АКА равно нулю.

6. Проводятся автономные испытания и контроль совокупности разных изделий по оптимальному плану $(x_i^*, \alpha_{\text{си}}^{*ai}, \beta_{\text{си}}^{*ai}, c = 0)$. В результате проведения испытаний и контроля номенклатуры изделий x_i^* из совокупности M_i возможны два исхода.

6.1. Случай 1. При контроле технических параметров изделий оказалось, что все параметры соответствуют требованиям, заданным в соответствующей документации (являются годными). В этом случае совокупность изделий АКА по результатам автономных испытаний принимается для изготовления и проведения автономных испытаний более высокого иерархического уровня – совокупности систем АКА.

6.2. Случай 2. При контроле технических параметров изделий оказалось, что хотя бы один параметр не соответствует заданным требованиям (является дефектным). В этом случае включается механизм управления: совокупность изделий бракуется, проводятся технические воздействия (схемно-конструктивные изменения, регулировки и т.д., т.е. доработки), направленные на приведение технических параметров в соответствие заданным требованиям. После реализации механизма управления определяется новый оптимальный план контроля совокупности изделий АКА при автономных испытаниях.

В обоих случаях 6.1 и 6.2 происходит накопление статистической информации о результатах испытаний изделий и состоянии их технических параметров. Эту информацию необходимо учитывать в первом случае при построении новых оптимальных планов испытаний совокупности изделий, во втором случае, при построении новых планов испытаний после доработок изделий совокупности. После проведения доработок совокупность изделий принимается по новому оптимальному плану.

7. Для построения нового оптимального плана испытаний поступаем следующим образом:

по вновь полученной информации [2,4] уточняются значения метрологических рисков 1 и 2 рода $\alpha_{y_j}, \beta_{y_j}$ каждого j -го параметра; уточняются значения оптимальных рисков 1 и 2 рода α_i^*, β_i^* и $P(A_{ii})$ – вероятности того, что i -ое изделие совокупности является годным, полученные на основе использования процедуры оптимизации контроля технических параметров изделий, разработанной в [2,4]; повторяются расчеты в соответствии с алгоритмом, приведенным выше по п.п. 1...5 и определяется новый оптимальный планы контроля совокупности разных изделий АКА.

Проводятся автономные испытания совокупности разных изделий АКА и

контроль их технических параметров по новому оптимальному плану. При этом реализация случая 6.1 приводит к приемке совокупности изделий АКА по результатам автономных испытаний для изготовления и проведения автономных испытаний более высокого иерархического уровня – совокупности систем АКА. Реализация случая 6.2 приводит к необходимости построения нового оптимального плана, проведению автономных испытаний совокупности разных изделий АКА и контролю их технических параметров по новому оптимальному плану и т.д. до приемки этой совокупности.

8. Рассматривается более высокий уровень иерархии АКА, то есть совокупность разных систем АКА, которые подлежат проведению их автономных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, что определить оптимальный план контроля этой совокупности с учетом результатов контроля совокупности изделий АКА нижнего уровня, а именно: оптимальные значения рисков 1 и 2 рода, а также номенклатуру систем, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры.

Используется выявленное свойство 1* и 2* и определяется [2,4,5] оптимальное значение апостериорного риска, с которым принята совокупность изделий предыдущего уровня, на основе формулы (28):

$$\beta_{си}^{*аи} = \prod_{i=1}^{x_{и}^*} [P(A_{иi})(1 - \alpha_{yиi}) + \beta_{иi}] - \prod_{i=1}^{M_{и}} P(A_{иi}) \prod_{i=1}^{x_{и}^*} (1 - \alpha_{yиi})$$

С учетом этого оптимальный план определяется на основе минимизации целевой функции, относящейся к совокупности разных систем АКА (12):

$$C_{сc}^{аи} = C_{1сc}^{аи} \alpha_{сc}^{аи} + C_{2сc}^{аи} \beta_{сc}^{аи} + \sum_{i=1}^{x_c} C_{1ic}^{аи}$$

Однако при решении задачи минимизации риски 1 и 2 рода $\alpha_{си}^{аи}$ и $\beta_{си}^{аи}$, входящие в целевую функцию и относящиеся к контролю всей совокупности систем АКА, определяются уже с учетом результатов предшествующего контроля совокупности изделий АКА нижнего уровня [2,4] по формулам:

$$\alpha_{сc}^{аи} = \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) [1 - \prod_{i=1}^{x_c} (1 - \alpha_{yic})] [1 - \beta_{си}^*], \quad (29)$$

$$\beta_{сc}^{аи} = \left\{ \prod_{i=1}^{x_c} [P(A_{ic})(1 - \alpha_{yic}) + \beta_{ic}] - \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) \prod_{i=1}^{x_c} (1 - \alpha_{yic}) \right\} \times [1 - (1 - \beta_{си}^*)], \quad (30)$$

где $P(A_{ic})$ – вероятность того, что i -ая система совокупности является годной;

x_c – неизвестная номенклатура систем из совокупности, подлежащих обязательному проведению испытаний и контролю их технических параметров.

Перейдем непосредственно к решению задачи оптимизации.

Исходными данными для ее решения являются:

$C_{1сc}^{аи}$ и $C_{2сc}^{аи}$ – средние экономические потери за счет браковки годной и приемки дефектной совокупности систем АКА данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь (рассчитываются по формулам [2,4];

$C_{1ic}^{аи}$ – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль i -ой системы совокупности, $i = \overline{1, M_{и}}$, (рассчитываются по формулам [2,4] для каждого изделия совокупности);

M_c – размер совокупности разных систем АКА;
 оптимальные риски 1 и 2 рода α_c^* , β_c^* и $P(A_{ic})$ – вероятность того, что i -ая система совокупности является годной, полученные на основе использования алгоритма оптимизации контроля технических параметров систем, разработанного в [2,4] (их количественные значения рассчитываются для всех систем $i = \overline{1, M_{и}}$).

По данным значениям уточняется вид целевой функции (12) с учетом выражений для рисков 1 и 2 рода (29) и (30)

$$C_{cc}^{ai} = C_{1cc}^{ai} \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) [1 - \prod_{i=1}^{x_c} (1 - \alpha_{yic})] [1 - \beta_{ci}^*] + C_{2cc}^{ai} \times \\ \times \left\{ \prod_{i=1}^{x_c} [P(A_{ic})(1 - \alpha_{yic}) + \beta_{ic}] - \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) \prod_{i=1}^{x_c} (1 - \alpha_{yic}) \right\} \times \\ \times [1 - (1 - \beta_{ci}^*)] + \sum_{i=1}^{x_c} C_{1ic}^{ai}, \quad (31)$$

Далее расчет ведется в соответствии с п.п. 2...5 аналогичным образом, как и для совокупности разных изделий АКА нижнего уровня иерархии.

В результате получаем оптимальную номенклатуру систем АКА $x_c = x_c^*$, подлежащую обязательному проведению автономных испытаний из совокупности, и соответствующие оптимальные значения рисков C_{cc}^{*ai} и C_{cc}^{*ai} :

$$\alpha_{cc}^{*ai} = \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) \left[1 - \prod_{i=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{yic}) \right] [1 - \beta_{ci}^*], \quad (32)$$

$$\beta_{cc}^{*ai} = \left\{ \prod_{i=1}^{x_c^*} [P(A_{ic})(1 - \alpha_{yic}) + \beta_{ic}] - \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) \prod_{i=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{yic}) \right\} \times \\ \times [1 - (1 - \beta_{ci}^*)] \quad (33)$$

То есть, получен оптимальный план контроля (x_c^* , α_{cc}^{*ai} , β_{cc}^{*ai} , $c = 0$) совокупности разных систем АКА с учетом результатов предшествующего контроля (автономных испытаний) совокупности изделий АКА нижнего уровня иерархии.

Далее, при контроле по оптимальному плану могут также иметь место случаи 6.1 и 6.2. Эти случаи достаточно подробно рассмотрены в п.п. 6 и 7 данного алгоритма и порядок действий остается прежним до приемки совокупности систем АКА по результатам автономных испытаний для изготовления и проведения комплексных испытаний более высокого иерархического уровня – АКА в целом.

10. Рассматривается самый высокий уровень иерархии, то есть АКА в целом, который подлежит проведению комплексных испытаний. На этом этапе задача состоит в том, что определить оптимальный план контроля технических параметров АКА, а именно: оптимальное количество и номенклатуру параметров АКА, подлежащих обязательному контролю, и оптимальные значения соответствующих рисков 1 и 2 рода с учетом результатов предшествующих автономных испытаний совокупностей изделий и систем АКА.

Прежде, чем приступить к решению задачи оптимизации, рассмотрим два случая, которые могут иметь место в практике.

10.1. Случай А. Если АКА является вновь разрабатываемой сложной технической системой, то головной разработчик может принять решение контролировать

при комплексных испытаниях АКА всю совокупность $N_{\text{пка}}$ технических параметров АКА $j = 1, N_{\text{пка}}$. Этот случай не требует решения задачи оптимизации, поскольку план контроля технических параметров будет $(N_{\text{пка}}, \alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}}, \beta_{\text{ка}}^{\text{ки}}, c = 0)$, где риски 1 и 2 рода определяются на основе (9), (10) при условии $x_{\text{пка}} = N_{\text{пка}}$, но с учетом результатов предшествующих автономных испытаний совокупности систем АКА на основе выражений:

$$\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} [1 - \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} (1 - \alpha_{\text{y}j})] (1 - \beta_{\text{cc}}^*), \quad (34)$$

$$\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \left\{ \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \left[\frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} (1 - \alpha_{\text{y}j}) + \beta_{\text{п}j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} (1 - \alpha_{\text{y}j}) \right\} \times [1 - (1 - \beta_{\text{cc}}^{\text{аи}})], \quad (35)$$

При таком плане контроля технических параметров АКА в целом при комплексных испытаниях также могут иметь место случаи, описанные в п.п. 6.1 и 6.2. и рассмотренные в п.п. 6 и 7 данного алгоритма. Порядок действий, в том числе и механизм управления техническими параметрами остается прежним до приемки АКА в целом по результатам комплексных испытаний.

10.2. Случай В. Этот случай соответствует необходимости решения задачи оптимизации, а именно: определению оптимальной номенклатуры параметров АКА в целом, подлежащих обязательному контролю при комплексных испытаниях, и оптимальных значений соответствующих рисков 1 и 2 рода с учетом результатов предшествующих автономных испытаний совокупностей изделий и систем АКА. Такой случай может иметь место, например, тогда, когда АКА через определенный промежуток времени перестанет быть вновь разрабатываемой системой, появятся серийные образцы. Либо, когда конструктор осуществляет совместное проектирование АКА и системы контроля его технических параметров, а также в ряде других случаев.

Прежде чем приступить к решению задачи оптимизации, определяется оптимальное значение апостериорного риска, с которым приняты совокупности изделий и систем предыдущих уровней при их автономных испытаниях, на основе формулы (33) с учетом реализованного механизма управления техническими параметрами [5]:

$$\beta_{\text{cc}}^{\text{аи}} = \left\{ \prod_{i=1}^{x_c^*} [P(A_{ic})(1 - \alpha_{\text{y}ic}) + \beta_{ic}] - \prod_{i=1}^{M_c} P(A_{ic}) \prod_{i=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{\text{y}ic}) \right\} \times [1 - (1 - \beta_{\text{си}}^*)]$$

Далее определяется оптимальный план контроля технических параметров АКА в целом при комплексных испытаниях на основе минимизации целевой функции, относящейся к ВРБ в целом (13):

$$C_{\text{ка}}^{\text{ки}} = C_{1\alpha}^{\text{ка}} \alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}} + C_{1\beta}^{\text{ка}} \beta_{\text{ка}}^{\text{ки}} + \sum_{j=1}^{x_{\text{пка}}} C_{1j}$$

Однако при решении задачи минимизации риски 1 и 2 рода $\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}}$ и $\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}}$,

входящие в целевую функцию и относящиеся к контролю технических параметров АКА в целом, определяются уже с учетом результатов предшествующего контроля совокупностей изделий и систем АКА нижних уровней на основе (34) и (35), по формулам:

$$\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{\text{пка}}} (1 - \alpha_{\text{y}j}) \right] (1 - \beta_{\text{сс}}^*), \quad (36)$$

$$\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \left\{ \prod_{j=1}^{x_{\text{пка}}} \left[\frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} (1 - \alpha_{\text{y}j}) + \beta_{\text{п}j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} \prod_{j=1}^{x_{\text{пка}}} (1 - \alpha_{\text{y}j}) \right\} \times \\ \times [1 - (1 - \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}})], \quad (37)$$

где $x_{\text{пка}}$ уже играет роль неизвестной номенклатуры технических параметров АКА, оптимальное значение которой необходимо определить.

Для решения задачи минимизации уточняется вид целевой функции (13) с учетом выражений (36) и (37). Далее используется процедура оптимизации технических параметров, изложенная в [2,4].

В результате использования этой процедуры получаем оптимальную номенклатуру технических параметров АКА в целом $x_{\text{пка}} = x_{\text{пка}}^*$, подлежащую обязательному контролю при проведении комплексных испытаний и соответствующие оптимальные значения рисков $\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}}$ и $\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}}$:

$$\alpha_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} \left[1 - \prod_{j=1}^{x_{\text{пка}}^*} (1 - \alpha_{\text{y}j}) \right] (1 - \beta_{\text{сс}}^*), \quad (38)$$

$$\beta_{\text{ка}}^{\text{ки}} = \left\{ \prod_{j=1}^{x_{\text{пка}}^*} \left[\frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} (1 - \alpha_{\text{y}j}) + \beta_{\text{п}j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{\text{пка}}} \frac{\alpha_{\text{п}j}}{\alpha_{\text{y}j}} \prod_{j=1}^{x_{\text{пка}}^*} (1 - \alpha_{\text{y}j}) \right\} \times \\ \times [1 - (1 - \beta_{\text{сс}}^{\text{аи}})], \quad (39)$$

которые учитывают результаты предшествующего контроля технических параметров совокупностей изделий и систем АКА, принятых по оптимальным планам.

Реализации предложенного алгоритма иерархического контроля позволяет найти следующие оптимальные характеристики:

оптимальный план контроля совокупности разных изделий АКА при автономных испытаниях, включающий в себя оптимальные значения рисков 1 и 2 рода, а также номенклатуру изделий, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры;

оптимальный план контроля совокупности разных систем АКА при их автономных испытаниях, включающий в себя оптимальные значения рисков 1 и 2 рода, а также номенклатуру систем, которые необходимо поставить на испытания, в процессе проведения которых должны контролироваться их технические параметры;

оптимальный план контроля технических параметров АКА в целом при его комплексных испытаниях, то есть оптимальную номенклатуру параметров АКА, подлежащих обязательному контролю, и оптимальные значения соответ-

вующих рисков 1 и 2 рода с учетом результатов предшествующего контроля совокупностей разных изделий и систем АКА.

Таким образом, предложенная модель и алгоритм иерархического контроля технических параметров позволяют:

осуществлять поэтапный контроль и управление техническими параметрами АКА по иерархическим уровням при наземной обработке, оптимальное как для каждого уровня, так и для АКА в целом;

обеспечить заданные требования к техническим параметрам изделий, систем АКА и АКА в целом за счет реализации функций контроля и управления на каждом иерархическом уровне;

сократить объемы наземной обработки изделий АКА более высоких уровней иерархии за счет учета результатов контроля и управления техническими параметрами изделий нижних уровней;

сократить экономические затраты на проведение наземной обработки АКА и потери, связанные с принятием ошибочных решений;

учесть результаты контроля и управления параметрами изделий низших уровней, при реализации контроля и управления параметрами более высоких уровней и АКА в целом, несмотря на различие контролируемых технических параметров на каждом уровне иерархии.

Литература

1. Рудаков В.Б., Макаров В.М. Оптимизация иерархического контроля технических параметров сложных электронных изделий автоматических космических аппаратов при отработочных испытаниях // Двойные технологии, 2016. № 1. С. 9-12.
2. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем. М.: СИП РИА, 2002. 355с.
3. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники // М.: Воен.издат., 1993. 393с.
4. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве // М.: Машиностроение, 2009. 400с.
5. Рудаков В.Б., Макаров В.М. Методика иерархического контроля технических параметров электронных изделий автоматических космических аппаратов при отработочных испытаниях в форсированных режимах // Двойные технологии, 2017. № 3. С. 37-43.

УДК 004.021

Система единого времени в автоматизированной системе управления воздушным движением «СИНТЕЗ-АР4»

А.В. Струкова, аспирант кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассмотрены и проанализированы особенности работы системы единого времени автоматизированной системы управления воздушным движением «СИНТЕЗ-АР4».

Система единого времени, средства единого времени, системный блок, метроном.

Unified time system in an automated system air traffic control «SYNTHESIS AP4»

A.V. Strukova, graduate student the Department of Information technologies and control systems,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article describes and analyzes the features of the operation of the system a single time, the automated system for air traffic management «SYNTHESIS-AP4».

System of uniform time, means of uniform time, system unit, metronome.

Введение. Огромную роль в работе комплекса средств автоматизации управления воздушным движением (КСА УВД) играет система единого времени (СЕВ) [5, 6]. Рассмотрим и проанализируем особенности работы СЕВ.

Система единого времени. Следует разделить понятия «единого» и «точного» времени. Система единого времени должна обеспечивать синхронное и монотонное системное время на серверах и потребителях СЕВ, при этом не гарантируется совпадение с «точным» временем. При наличии источников «точного» времени, сервера СЕВ корректируют скорость хода системного времени с целью максимального приближения к данным источника «точного» времени. При отсутствии источников «точного» времени, система должна работать в автономном (аварийном) режиме с обязательным требованием коррекции хода системных часов.

СЕВ обеспечивает синхронизацию системного времени локального компьютера с единым временем до запуска всех остальных компонент специального программного обеспечения (СПО) комплекса, т.е. мгновенное (скачкообразное)

изменение времени возможно только при запуске системного блока (СБ).

Система реализована по архитектуре «сервер-клиент» [1, 4]. При этом рассылка сигналов единого времени производится только основным сервером СЕВ.

СЕВ предусматривает защиту от некорректных данных источника «точного» времени (сбой приемника глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС), ошибки инициализации серверов NTP (Network Time Protocol – сетевой протокол для синхронизации внутренних часов компьютера) и т.п.).

В качестве источников «точного» времени могут выступать:

- внешние сервера NTP (mainberg, сервера интернета через firewall, сервера единого времени «метроном» из внешнего контура локальной вычислительной сети (ЛВС) комплекса или подсистемы);
- плата приемника ГНСС (K161, Trimble и т.п.).

В случае однотипных источников (два сервера mainberg) может использоваться резервирование с запрещением использования неоднородной информации по смежным каналам.

Неоднотипные источники «точного» времени должны использоваться в соответствии с заданным приоритетом.

Сервером единого времени устанавливается сервер IS-S1, IS-S2, BPS-S1 или BPS-S2, который первый получил метку единого времени и синхронизировался.

В случае отсутствия меток времени сервером единого времени устанавливается первый запустившийся сервер из вышеперечисленных по истечении одной минуты.

Средства единого времени. Они обеспечивают:

- с заданной точностью сигналы времени;
- внешним потребителям и в ЛВС выдачу шкалы времени с ее привязкой к шкале всемирного координированного времени с применением ГЛОНАСС/GPS;
- единую синхронизацию вычислительных процессов;
- отображение текущего времени на индикаторах рабочих мест диспетчерского и технического персонала системы;
- отображение текущего времени на часах коллективного и индивидуального пользования.

Привязка таймеров вычислительных средств к СЕВ осуществляется автоматически.

Коррекция точного времени главных часов осуществляется автоматически по сигналам спутниковой системы навигации ГЛОНАСС/GPS [1, 2].

Подключение СЕВ в КСА УВД приведено в укрупненной структурной схеме КСА УВД.

В качестве тахометрической станции применяется NTP сервер точного времени Метроном-300, представленный на рисунке 1.



Рисунок 1 – Сервер точного времени

Метроном-300 обеспечивает синхронизацию и распространение единого и точного времени в подключенной TCP/IP (TCP/IP - сетевая модель передачи данных) сети и может использоваться как сервер первого уровня (Stratum-1-Server). Дополнительно Метроном-300 может применяться в качестве оборудования тактовой сетевой синхронизации – первичного эталонного источника с формированием частотных сигналов 1Гц (1PPS), 10 МГц, 2.048МГц, 2.048Мбит/с.

Сервер Метроном-300 состоит из совмещенного спутникового приемника ГЛОНАСС / GPS, управляющего компьютера с блоком сетевых и интерфейсных карт и источника питания, размещенных в металлическом 19 дюймовом корпусе.

Источником времени для сервера является приемник ГЛОНАСС/GPS, принимающий сигналы систем ГЛОНАСС и GPS. Прием и обработка сигналов обеих систем осуществляется одновременно, что сделано для повышения точности расчета местоположения и времени. При отсутствии сигналов одной из систем приемник автоматически продолжает работу с оставшейся. В меню сервера предусмотрена возможность принудительного выбора опорной системы.

В качестве LED (light-emitting diode – светоизлучающий диод) дисплеев даты/времени группового пользования используется модель VP100/20/NET, представленная на рисунке 2, имеющая встроенный LAN (Local Area Network – это локальная сеть) интерфейс, последовательные интерфейсы RS-232, токовую петлю 20мА и хорошо различимые символы высотой 50 мм.



Рисунок 2 – LED дисплей даты/времени группового пользования

В качестве LED дисплеев даты/времени индивидуального пользования используются модели ANZ14/NET в соответствии с рисунком 3, которые встраиваются в пульта диспетчеров, имеют LAN интерфейс, последовательные интерфейсы RS-232, токовую петлю 20 мА и хорошо различимые символы высотой 14/13 мм.

Корректор метронома (рисунок 3). Информационные поля:

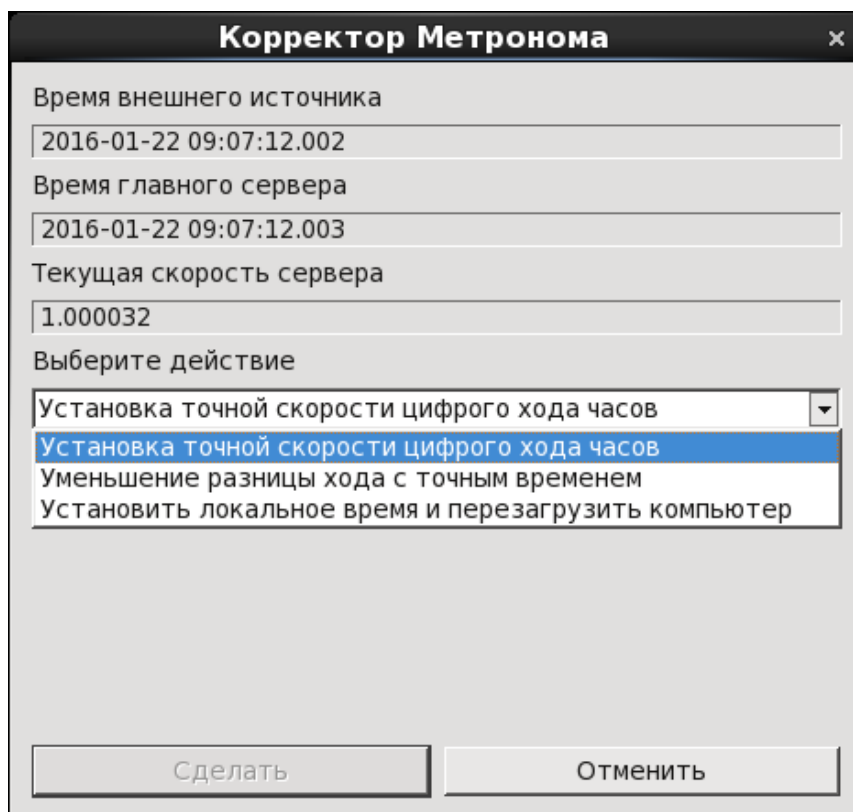


Рисунок 3 – Внешний вид окна «Корректор Метронома»

- время внешнего источника – последний замер времени, полученный главным сервером от внешнего источника;
- время главного сервера – время, которое было на главном сервере при получении времени от внешнего источника;
- текущая скорость сервера – текущая скорость хода цифровых часов на главном сервере.

Установка точной скорости цифрового хода часов (рисунок 5).

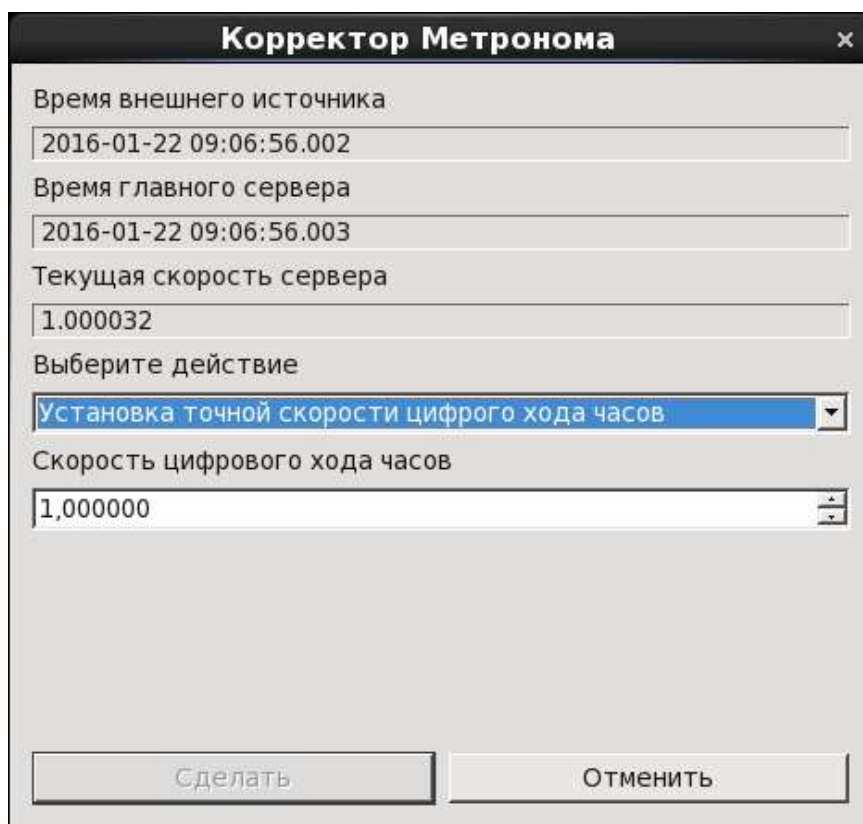


Рисунок 4 – Установка точной скорости цифрового хода часов

Назначает точное значение скорости цифрового хода часов на главном сервере, рассчитанное оператором вручную. Скорость задается значением в диапазоне от 0.9 до 1.1, где за 1.0 принимается базовое стартовое значение скорости цифрового хода часов на главном сервере, то есть регулируется в диапазоне $\pm 10\%$.

Уменьшение разницы хода с точным временем. Выполняется изменение разницы хода с точным временем внешнего источника синхронизации на определенное количество секунд с заданной скоростью цифрового хода часов возможное за время не более 1 часа.

Разница хода может задаваться либо конкретным значением, либо автоматически рассчитываться как различие между локальным временем и точным временем, указанным оператором (рисунок 6).

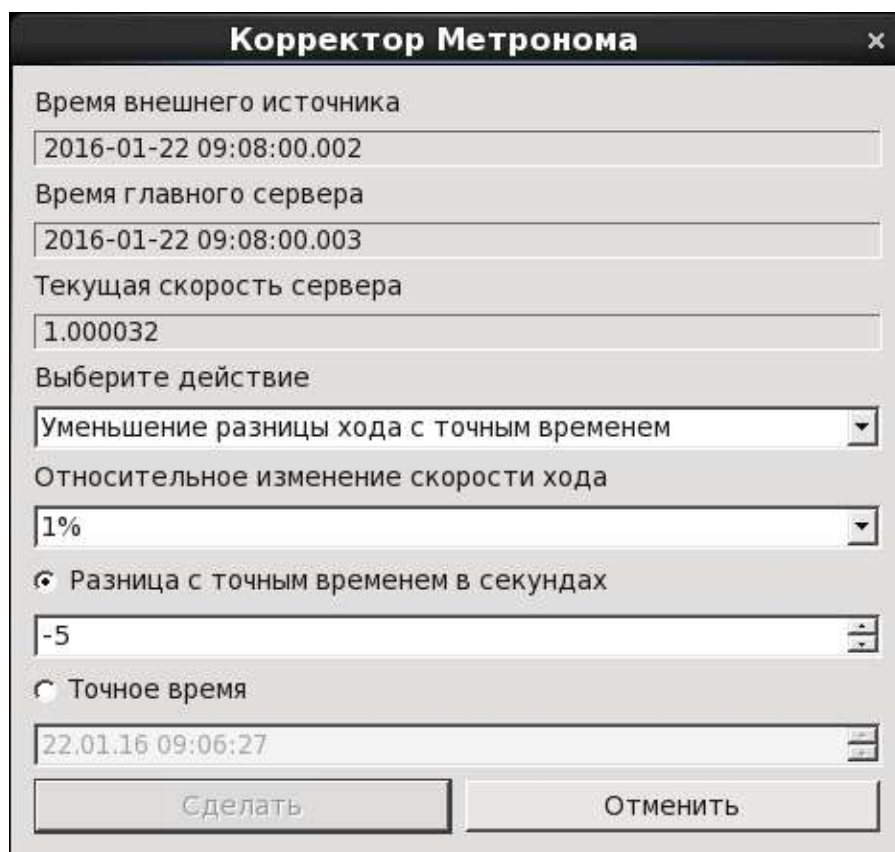


Рисунок 5 – Уменьшение разницы хода с точным временем

Установить локальное время и перезагрузить компьютер. Функция предназначена для установки времени на главном сервере времени комплекса при холодном старте (вместо установки времени в BIOS (Basic Input-Output System – базовая система ввода-вывода)). Программное обеспечение к моменту установки времени может быть уже запущено, поэтому необходим немедленный перезапуск рабочего места (рисунок 7).

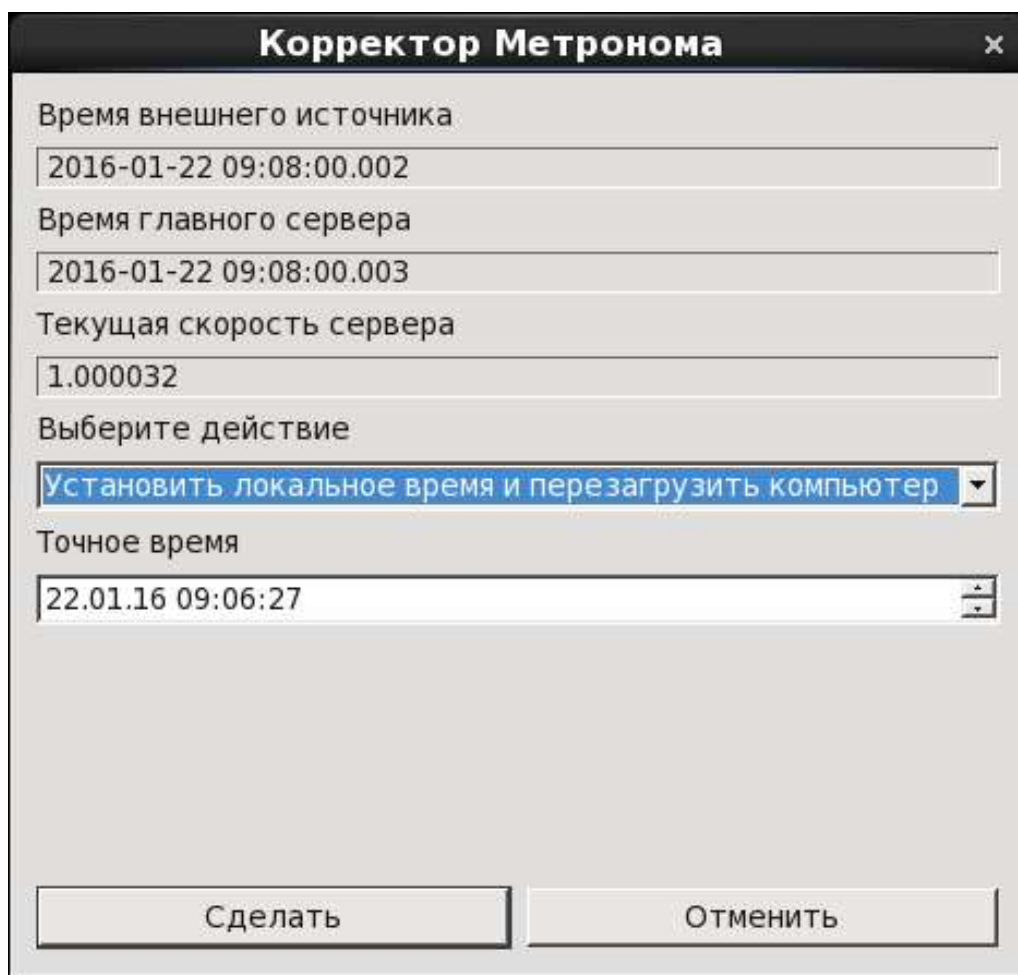


Рисунок 6 – Установка локального времени и перезагрузка компьютера

Кнопка «Сделать» доступна в двух случаях:

- сильное расхождение времени с внешним источником синхронизации (больше 14сек);
- внешний источник синхронизации не доступен.

В случае если действие корректора не привело к синхронизации с внешним источником времени, то через 1 час потребуются повторное действие оператора.

Диагностика. Порядок каналов – текущий список каналов, используемый для получения информации о точном времени.

Для главного сервера должны быть перечислены Meinberg’и, для резервных серверов и клиентов – локальные сети (ServerNet), куда выдает время главный сервер через бродкаст.

Канал установивший время – канал, из которого было установлено время при старте метронома по первому пакету.

Текущий канал – канал, выбранный метрономом для получения данных

о точном времени.

Состояние запроса на коррекцию времени – индикатор состояния времени на компьютере:

«Не требуется» – метроном автоматически подводит время по текущему каналу.

«Ожидание ответа» – расхождение локального и единого времени велико и требуются действия оператора через корректор или автоматизированное рабочее место инженера.

Управление временем/Текущая скорость – скорость цифрового хода внутренних часов.

Может быть установлена в интервале от 0,9 до 1,1. 1 – стартовое значение.

В нормальной ситуации автоматически регулируется метрономом в соответствии с данными от текущего канала времени. Меняется при поступлении количества замеров, равного глубине внутреннего буфера (равного параметру «Количество замеров», когда он перестанет расти). При темпе поступления информации раз в секунду и глубине буфера в 60 замеров, скорость будет рассчитываться раз в минуту.

При отсутствии источников данных о времени или существенном расхождении с ними должна регулироваться инженером через корректор.

Управление временем/Длительно определяемая скорость – раз в секунду параметр «Текущая скорость» запоминается, и на основе этих данных за последние сутки как среднее арифметическое рассчитывается длительно определяемая скорость.

Она будет установлена метрономом автоматически при отсутствии данных от внешнего источника времени.

Полный перечень диагностируемых параметров и их описание приведен в руководстве по эксплуатации для системного инженера.

Заключение. Таким образом, рассмотрена и проанализирована работа системы единого времени «СИНТЕЗ-АР4» в комплексе средств автоматизации управления воздушным движением. Показано, что система единого времени играет огромную роль, обеспечивая синхронизацию системного времени локального компьютера с единым временем еще до запуска всех остальных компонент комплекса, т.е. мгновенное (скачкообразное) изменение времени возможно только при запуске системного блока.

Литература

1. Артющенко В.М., Воловач В.И. Измерение параметров движения протяженных объектов в условиях мешающих воздействий и изменяющейся дальности // Двойные технологии, 2015. № 1 (70). С. 69-74.
2. Артющенко В.М., Воловач В.И. Измерение информационных параметров сигнала в условиях воздействия аддитивных негаусовских коррелированных помех // Автометрия, 2016. Т. 52. № 6. С. 22-28.
3. Артющенко В.М., Кучеров Б.А. Оценка требуемой пропускной способности каналов управления в корпоративной сети спутниковой связи с

- регулируемыми параметрами // Информационно-технологический вестник, 2015. № 02. С.23.
4. Клеван С.И. Руководство по эксплуатации КСА УВД «СИНТЕЗ-АР4» // Клеван С.И., ОАО «ВНИИРА». 2013.
 5. Струкова А.В. Обеспечение внедрения модернизируемой структуры и автоматизации процессов управления воздушным движением в зоне ответственности московского района управления воздушным движением // Информационно-технологический вестник, 2018. № 3 (17). С.46-54.

УДК 53.082.743

Тонкопленочные магниторезистивные датчики тока

В.И. Суханов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
ведущий специалист,

А.Б. Грабов, ведущий инженер,
Акционерное общество «Научно-производственное объединение
измерительной техники» (АО «НПО ИТ»),
г. Королев, Московская область

В статье представлены основные характеристики разработанных в АО «НПО ИТ» тонкопленочных магниторезистивных чувствительных элементов и созданных на их основе датчика и детектора бесконтактного контроля тока в цепях электронной аппаратуры авиационной и ракетно-космической техники.

Тонкопленочные магниторезистивные датчики тока, тонкопленочные магниторезисторы, анизотропный магниторезистивный эффект.

Thin-film magnetoresistive current sensors

V.I. Sukhanov, Ph.D. (technique), senior scientist, leading specialist,
A.B. Grabov, leading engineer,

Joint-stock Corporation «Research and production association of measuring technics»
(JSC «NPO IT»), Korolyov, Moscow region

The article presents some features of thin-film magnetoresistive current sensors and detectors that was developed in JSC NPO IT for noncontact current control in electric circuit aviation and cosmic electronic apparatus.

Thin-film magnetoresistive current sensors, thin-film magnetoresistance, anisotropic magnetoresistive effect.

Введение

Достоверное измерение тока в электрических цепях приборов авиационной и ракетно-космической техники является важным аспектом обеспечения их высокой надежности и безопасности. Однако не все задачи контроля тока в электрических цепях приборов могут быть решены существующими методами и устройствами. Большинство из них обладают такими недостатками, как отсутствие гальванической развязки между контролируемой цепью и датчиком (обычно высокоточным резистором) или невозможностью бесконтактного измерения малого тока (например, с помощью датчиков на основе эффекта Холла). Для бесконтактного контроля малого (менее 100 мА) тока последнее время все шире начинают применяться датчики, основанные на использовании магниторезистивного эффекта в тонких пленках ферромагнетика [1,2]. Датчики этого типа позволяют измерять переменный и постоянный ток от единиц до нескольких десятков мил-

лиампер.

В АО «НПО ИТ» разработана технология изготовления тонкопленочного магниторезистивного чувствительного элемента бесконтактного контроля тока, на основе которого созданы датчик и детектор тока, предназначенные для применения в бортовых приборах авиационной и ракетно-космической техники.

Тонкопленочный чувствительный элемент бесконтактного контроля тока

Разработанный чувствительный элемент тока (ЧЭТ) содержит кристалл с измерительной схемой и магниты подмагничивания (рис. 1). ЧЭТ обеспечивает преобразование, постоянного и переменного тока, проходящего по токовой шине, в электрический выходной сигнал (напряжение электрического тока).

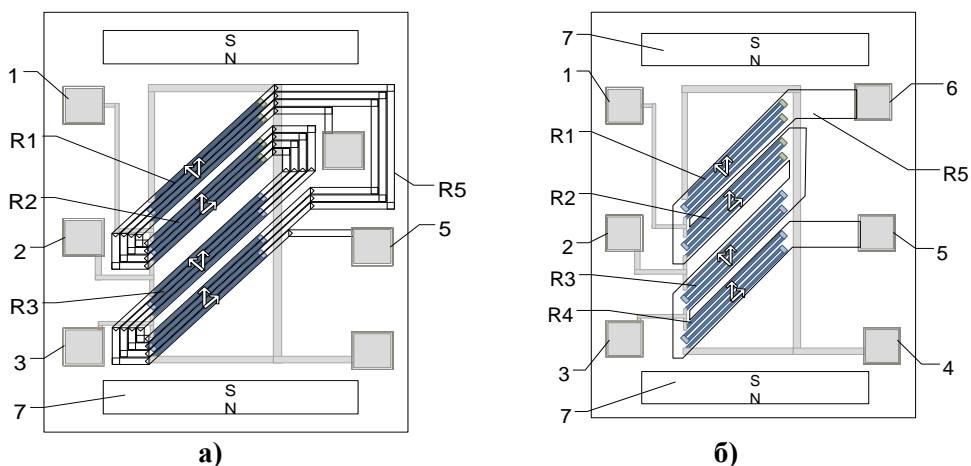


Рисунок 1 – Чувствительные элементы тока на диапазоны измерения ± 30 мА (а) и ± 60 мА (б)

R1, R2, R3, R4 – магниторезисторы; R5 – токовая шина; 1, 2, 3, 4, - контактные площадки мостовой измерительной схемы; 5, 6 – контактные площадки токовой шины; 7 – магниты

Принцип действия ЧЭТ основан на использовании анизотропного магниторезистивного эффекта в тонких пленках ферромагнетика [2]. Измерительная схема ЧЭТ представляет собой замкнутый мост из четырех тонкопленочных магниторезисторов R1, R2, R3 и R4, состоящих из параллельных друг другу полосок ферромагнетика, соединенных между собой низкорезистивными перемычками из немагнитного металла. Полоски изготовлены из пленки магнитомягкого ферромагнетика Fe(18%)Ni(76%)Co(6%) толщиной (20...30) нм. Во всех четырех магниторезисторах полоски ориентированы под углом 45° к оси легкого намагничивания (ОЛН) пленки, из которой они изготовлены. Ось легкого намагничивания создается в исходной пленке в процессе её напыления.

Токовая шина R5 расположена над магниторезисторами и изолирована от них слоем диэлектрика. Шина датчика на рисунке 1а выполнена в виде косо́го меандра, а на рисунке 1б – в виде плоской катушки. Рабочие полоски токовой шины расположены над магниторезисторами и соединены между собой так, что

индукция магнитного поля, возникающего при прохождении по ним тока, в местах расположения соседних магниторезисторов ориентирована в противоположные стороны. С помощью контактных площадок 5 и 6 токовая шина подключается последовательно в контролируемую электрическую цепь. Изменение числа рабочих полосок токовой шины позволяет изменять диапазон измерения ЧЭТ и его чувствительность к контролируемому току. Токовая шина, показанная на рисунке 1а, обеспечивает максимальную чувствительность ЧЭТ к току, а показанная на рисунке 1б – максимальный диапазон измерения по току. Технические решения, предложенные в процессе проведения разработки ЧЭТ, защищены патентами [3,4].

В состав ЧЭТ входят один или два магнита 7, которые должны создавать в месте расположения измерительной схемы вдоль ОЛН одноосное поле от 0,2 до 0,4 мТ. Такое магнитное поле поддерживает в отсутствие контролируемого тока намагниченность магниторезисторов и тем самым стабилизирует начальный выходной сигнал ЧЭТ, при этом сохраняет достаточно высокую чувствительность его измерительной схемы к току в шине. Для создания поля подмагничивания в разработанных АО «НПО ИТ» изделиях использованы магниты на основе сплава кобальт-самарий производства АО «ПОЗ-Прогресс», обладающих очень низким температурным коэффициентом индукции в диапазоне изменения температуры от -60 до +200 С°.

Разработанные кристаллы могут поставляться заказчику на плате-носителе в качестве отдельного изделия под наименованием «узел электронный магниторезистивный» (УЭМР), который представляет собой кристалл с золотыми проводниками. Разработаны два исполнения: УЭМР746 и УЭМР746-01, предназначенные для измерения тока, соответственно, в диапазонах ± 30 мА и ± 60 мА. Для защиты от воздействия окружающей среды все элементы тонкопленочной структуры УЭМР, включая контактные площадки с приваренными к ним выводами, закрыты эмалью (рис. 2).

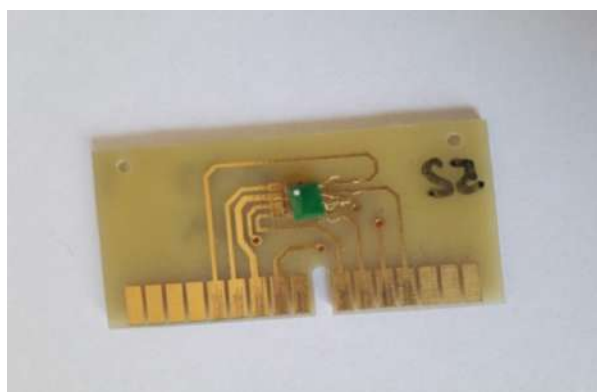


Рисунок 2 – Узел электронный магниторезистивный на плате-носителе

Чувствительный элемент тока работает следующим образом. Мостовая измерительная схема с помощью контактных площадок 1 и 3 подключается к источнику электрического питания (например, генератору напряжения), а с помо-

щью контактных площадок 2 и 4 к измерительному прибору (например, вольтметру). В отсутствие контролируемого тока векторы намагниченности полосок, из которых состоят магниторезисторы, ориентированы вдоль их оси легкого намагничивания, как показано на рисунке 1. При появлении электрического тока в проводнике управления, возникающее вокруг его рабочих полосок магнитное поле разворачивает векторы намагниченности магниторезисторов в соседних плечах моста в противоположные стороны (рис. 1). При этом сопротивление магниторезисторов R1 и R3 изменяется в одну сторону (например, уменьшается), магниторезисторов R2 и R4 в другую сторону (например, увеличивается). В результате выходной сигнал магниторезистивного датчика изменяется пропорционально значению тока в проводнике управления. В тоже время, внешнее однородное магнитное поле практически не влияет выходной сигнал ЧЭТ, поскольку оно разворачивает намагниченность всех четырех магниторезисторов в одну сторону и тем самым одинаково изменяет их сопротивление. На рисунке 3 показан пример функции преобразования ЧЭТ, предназначенном для работы в диапазоне ± 30 мА, а в таблице 1 представлены основные технические характеристики разработанных ЧЭТ.

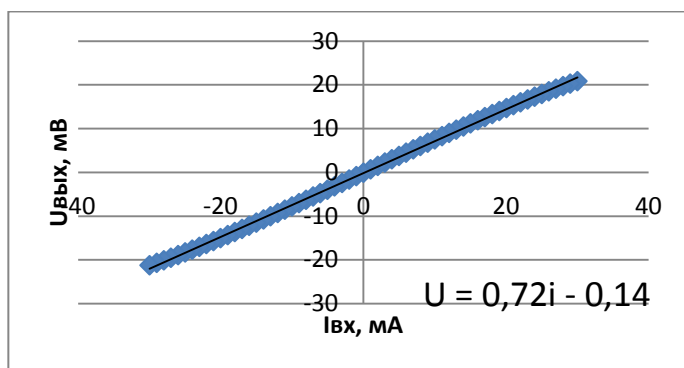


Рисунок 3 – Функция преобразования ЧЭТ при $U_{пит}=9В$

Таблица 1 – Основные технические характеристики чувствительных элементов и датчиков тока

Изделие	ЧЭТ	ДТЛ
Диапазон измерения, мА	± 30 ; ± 60	от 0 до 30 от 0 до 60
Сопротивление токовой шины, Ом -для диапазона измерения ± 30 мА -для диапазона измерения ± 60 мА		от 12 до 15 от 1,5 до 2,0
Сопротивление мостовой измерительной схемы, Ом		от 1800 до 2200
Напряжение питания постоянного тока, В	от 5 до 9	9
Функция преобразования		линейная
Нелинейность, %		не более 3
Начальный выходной сигнал	$\pm 0,5$ мВ/В	$(0,75 \pm 0,25)В$
Максимальный выходной сигнал	-	$(7,0 \pm 0,5)В$
Коэффициент преобразования, мВ/(В А)		

-для диапазона измерения ± 30 мА	от 70 до 90	-
-для диапазона измерения ± 60 мА	от 35 до 45	-
Диапазон рабочих частот, кГц	от 0 до 10	-
Неравномерность амплитудно-частот-ной характеристики, %	не более 5	-
Диапазон рабочих температур, °С	от - 40 до +85	
Ток утечки между токовой шиной и мостовой измерительной схемой в нормальных условиях при 15 В, нА	не более 5	
Габаритные размеры, мм	4,6x3,8x0,4	30,5x17,9x5,3

Датчик и детектор тока

На основе ЧЭТ в АО «НПО ИТ» разработаны датчик тока ДТЛ и детектор тока УФПТ. Датчик тока содержит следующие основные структурные элементы: узел электронный магниторезистивный, магниты подмагничивания и усилитель. Детектор тока кроме перечисленных элементов содержит компаратор и оптопару. Усилитель и компаратор совместно обеспечивают усиление выходного сигнала мостовой схемы ЧЭТ и настройку значения тока, при котором происходит переход выходного сигнала УФПТ из одного в другое логическое состояние. Оптопара обеспечивает гальваническую развязку выходной цепи детектора от его электрической схемы. Основные технические характеристики датчиков представлены в таблице 1, а детектора – в таблице 2. Зона «неопределенности» от 5 до 10 мА включает в себя разброс значений контролируемого тока, при котором происходит переключение выходного сигнала УФПТ от изделия к изделию и его температурное изменение. Конструктивно датчик и детектор представляют собой микросборку, помещенную в металлокерамический корпус для изделий микроэлектроники производства ОАО «Завод Марс» (рис. 4).

Таблица 2 – Основные технические характеристики детектора тока УФПТ011

Диапазон изменения контролируемого тока, мА	от 0 до 300
Сопротивление токовой шины, Ом	от 12 до 15
Напряжение питания, В	9
Выходной сигнал, В	Логические «0» и «1»
Диапазон изменения контролируемого тока, соответствующий логическому «0», мА	от 0 до 5
Диапазон изменения контролируемого тока, соответствующий логической «1», мА	от 10 до 300
Падение напряжения на входе при токе 300 мА, В	не более 0,6
Ток утечки через закрытый выход, мА.	не более 0,01
Падение напряжения на открытом выходе при токе 20 мА, В	не более 0,75
Диапазон рабочих температур, °С;	от - 10 до +50
Габаритные размеры, мм	30,5x17,9x5,3

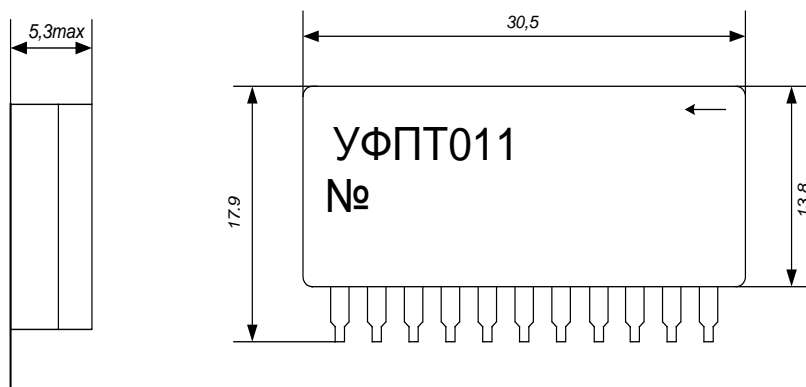


Рисунок 4 – Габаритные размеры датчика и детектора тока.

Заключение

Разработанные тонкопленочные чувствительные элементы прошли испытания на воздействие температурных, механических и других влияющих физических величин. На их основе могут создаваться высокоточные средства бесконтактного измерения малого тока в электрических цепях аппаратуры, предназначенной для авиационной, ракетно-космической и другой техники как специального, так и общепромышленного назначения.

Литература

1. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т.1. // М: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
2. Tumanski S. Handbook of magnetic measurements // © Taylor & Francis Group LLC. 2011. 382 с.
3. Ажаева Л.А., Веселов А.В., Грабов А.Б. и др. Патент RU2533747. Магнито-резистивный датчик тока. Опубликовано 20.11.2014. Бюл. № 32.
4. Ажаева Л.А., Грабов А.Б., Суханов В.И. и др. Патент RU2601281. Магнито-резистивный датчик тока. Опубликовано 27.10.2016. Бюл. № 30.

УДК 536.532

Метод снижения инерционности термопарного кабеля КТМС на основе кабеля переменного сечения для повышения надежности в авиационной и ракетно-космической технике

П.А. Филиппович, главный технолог,

Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область,

С.А. Гурова, магистрант,

«Российский университет дружбы народов» (РУДН), г. Москва

Рассмотрен метод снижения инерционности термопарного кабеля КТМС на основе использования кабеля переменного сечения. Приведен сравнительный анализ времени установления теплового равновесия термопарного кабеля с переменным сечением и без него. Рассмотрено время до установления теплового равновесия. С технологической точки зрения обоснованно применение термопар на базе хромель-алюмель. Приведены показатели инерционности термопарного кабеля переменного сечения.

Ключевые слова: термопарный кабель, инерционность, чувствительный элемент, ракетно-космической техники.

Method of reducing the inertia of a thermocouple cable CTMS based on a cable of variable cross-section to improve reliability in aviation and rocket and space technology

P.A. Filippovich, Chief Technologist,

Stock company «Scientific-production Association measuring equipment» (SC «SP AME»), Korolev, Moscow region

S.A. Gurova, Undergraduate,

«Peoples` Friendship University of Russia», Moscow

The method of reducing the inertia of the thermocouple cable ctms based on the use of a cable of variable cross-section is considered. The comparative analysis of time of establishment of thermal equilibrium of a thermocouple cable with variable cross-section and without it is given. The time before the establishment of thermal equilibrium is considered. From a technological point of view, the use of thermocouples based on chromel-alumel is justified. The parameters of inertia of a thermocouple cable of variable cross-section are given.

Thermocouple cable, lag, sensing element, rocket and space technology.

Особое внимание при эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) уделяется эксплуатационно-техническим свойствам: надежности, устойчивости, живучести, безопасности и другим свойствам. Наиболее важными из перечис-

ленных свойств это надежность и безопасность. Надежность является одним из основных эксплуатационных свойств изделия [2, С.17]. Повышение показателей надежности изделия приводит к безопасности, стабильной работе РКТ, снижению сходов и внештатных ситуаций в целом.

При обработке и эксплуатации РКТ подвергается чрезвычайно высоким нагрузкам и влиянию различных неблагоприятных факторов: вибрация, радиация, шум, температура, перегрузки. Все эти показатели и факторы необходимо учитывать и как следствие необходимо их контролировать в процессе подготовки и при полете летательного и космического аппарата, так как они могут оказать негативное влияние при эксплуатации РКТ и привести к сходу. Детальный анализ, предварительный расчет, испытания и контроль позволяет повысить стабильность работы РКТ, то есть повысить надежность.

Для обеспечения надежности в РКТ используются всевозможные агрегаты, приборы и датчики. Все они контролируют состояние полета, а так же работоспособность всех изделий на борту. В частности необходимо контролировать расход топлива, температуру двигателя, скорость космического аппарата, уровень радиации, ориентацию, давление на борту, герметичность, температуру на борту и много другое.

Особое внимание необходимо уделить двигательному отсеку, в котором размещается ракетный двигатель, так же в двигательном отсеке располагаются агрегаты, приборы и датчики, позволяющие контролировать работу ракетного двигателя и его параметры [1, С.96]. Очевидно, что для обеспечения работоспособности данного узла необходима высокая надежность и безопасности при эксплуатации, особенно если это касается системы аварийной защиты (САЗ).

Для определения и контроля температурных параметров в РКТ применяются датчики температуры. Одним из основных элементов датчика температуры является термопарный кабель.

В промышленности, ракетно-космической технике и во многих других отраслях широко применяются термопарные кабели. Основным параметром термопарного кабеля является время до установления теплового равновесия (инерционность). Данный параметр особо важен в ответственных системах и изделиях, например, таких как в системах аварийной защиты (САЗ). Однако существует проблема взаимозависимых параметров: инерционности и прочности [8, С 81].

Для решения данной проблемы рассмотрим несколько конструкторско-технологических решений термопарного кабеля (термопреобразователь) с точки зрения надежностных характеристик:

- 1) Кабель однозонный термопреобразователь круглого постоянного сечения с изолированным рабочим спаем: смотрите рисунок 1 [3, С.3].
- 2) Кабель термопреобразователь круглого сечения с утоненным рабочим участком: смотрите рисунок 2 [3, С.5].
- 3) Кабель термопреобразователь с плоским рабочим участком: смотрите рисунок 3 [3, С.7].
- 4) Кабельный многозонный термопреобразователь: смотрите рисунок 4 [3, С.9].

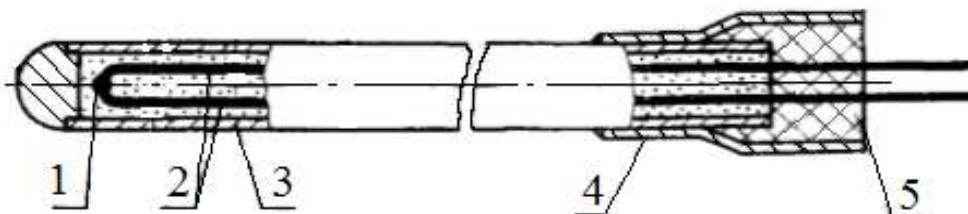


Рисунок 1 – Кабель однозонный термопреобразователь круглого постоянного сечения с изолированным рабочим спаем

1-рабочий спай; 2-термоэлектроды; 3-оболочка; 4-втулка; 5-герметик

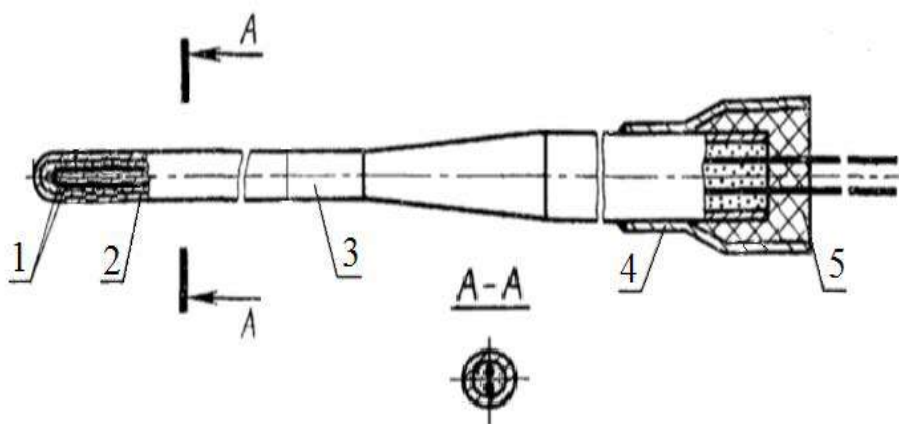


Рисунок 2 – Кабель термопреобразователь круглого сечения с утоненным рабочим участком

1-термоэлектроды; 2-оболочка; 3-утоненный участок; 4-втулка; 5-герметик

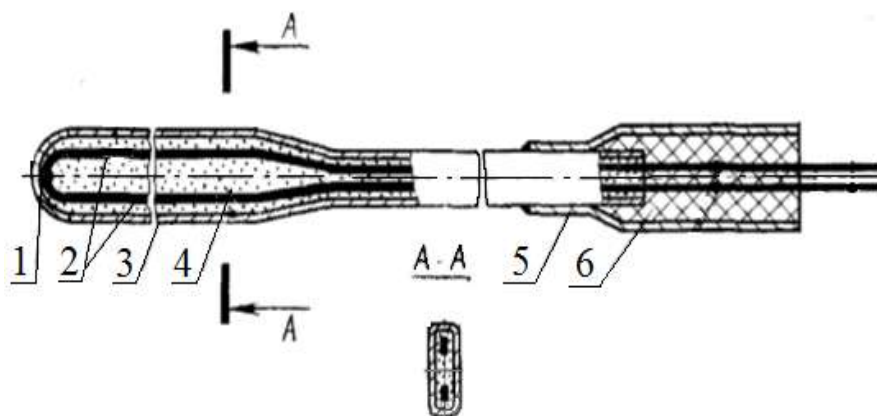


Рисунок 3 – Кабель термопреобразователь с плоским рабочим участком
1-рабочий спай; 2-термоэлектроды; 3-оболочка; 4-изоляция; 5-втулка; 6-герметик

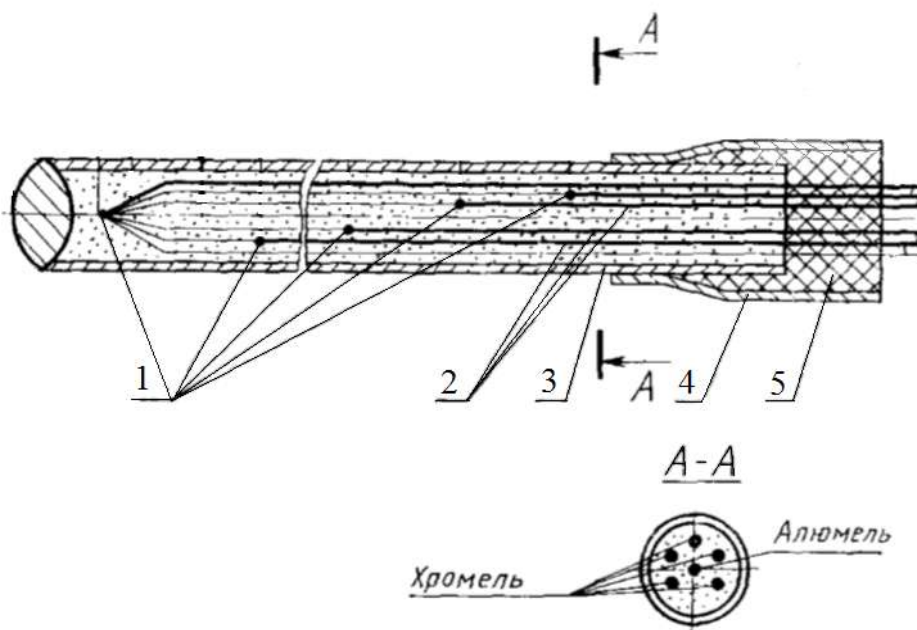


Рисунок 4 – Кабельный многозонный термопреобразователь

1-рабочий спай; 2-термоэлектроды; 3-оболочка; 4-втулка; 5-герметик

Очевидно, что термопарные кабели имеют общую конструктивную составляющую. Это металлическая оболочка, которая является корпусом, а так же термоэлектродные жилы (две или более), сами термоэлектродные жилы изолированные друг от друга [7, С.81].

Каждый из приведенных типов термопреобразователей применяется в зависимости от условий эксплуатации, но имеет общий принцип действия, основанный на использовании термоэлектрического эффекта [9, С.246]. Стоит отметить, что для контроля и испытаний летательных аппаратов и их систем основным параметром термопарного кабеля является инерционность, а так же прочность, так как система испытывает высокие вибрационные нагрузки. С целью снижения инерционности и сохранения прочностных характеристик необходимо остановиться на конструктиве, показанном на рисунке 2.

Уменьшение диаметра термоэлектродов приведет к уменьшению диаметра рабочего спая, при этом уменьшится инерционность. Такую зависимость можно наблюдать в таблице 1 [4, С.206] у кабеля на базе хромель-алюмельных термопар. Данная термопара является наиболее распространенной, она используется в промышленности и при научных исследованиях. Термопара хромель-алюмель позволяет [6]:

- 1) продолжительно измерять температуру до 1100 °С;
- 2) непродолжительно – до 1300 °С;
- 3) используется для измерения низких температур вплоть до минус 200 °С (70К).

Термопара хромель-алюмель применяется при работе как в окислитель-

ных, так и в инертных средах, данная термопара может непродолжительно эксплуатироваться в вакууме и работать для измерений в сухом водороде, что является еще одним преимуществом. Хромель-алюмель является одна из немногих имеющая устойчивость при работе в условиях реакторного облучения [6].

Таблица 1 – Время установления теплового равновесия хромель-алюмельных термопар

Диаметр термоэлектродов, мм	Диаметр рабочего спая, мм	Время до установления теплового равновесия, с
0,5	1	0,6-0,8
1,2	2,4	1,20-1,6
1,5	3,0	1,6-2,1

Стоит отметить, что уменьшение диаметра приведет и к снижению прочностных характеристик, а это не позволит использовать термопарный кабель в условиях высокой вибрационной нагрузки особенно в авиационной и ракетно-космической технике. Для решения данной взаимосвязи предлагается использование кабеля термопарного КТМС с переменным сечением позволит уменьшить инерционность за счет уменьшения массы горячего спая и сохранить прочностные характеристики термометров, что показано на рисунке 5 [8. С.81].

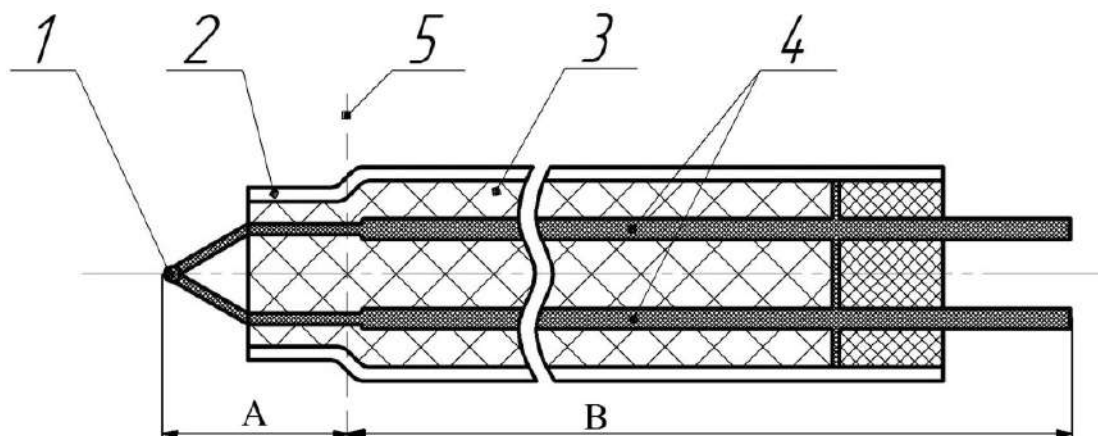


Рисунок 5 – Термопарный кабель с переменным сечением

1-рабочий спай; 2-оболочка; 3-изоляция; 4-термоэлектроды; 5-зона переменного сечения; А-участок уменьшенного сечения; В-участок без изменения

Принципиальным преимуществом термопарных кабелей является возможность изготовления из них термопар переменного по длине диаметра. В месте расположения спая термопара может иметь минимальный диаметр [5. С.49].

Таким образом предлагаемый метод позволяет снизить инерционность термопарного кабеля КТМС в ~2 раза, при уменьшении диаметра термоэлектрода в 2 раза, что приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Время установления теплового равновесия термопары с переменным сечением

Диаметр термоэлектродов, мм		Диаметр рабочего спая, мм		Время до установления теплового равновесия, с	
Однозонный	Участок уменьшенного сечения	Однозонный	Участок уменьшенного сечения	Однозонный	Участок уменьшенного сечения
0,5	0,25	1	0,5	0,6-0,8	0,3-0,4
1,2	0,6	2,4	1,2	1,20-1,6	0,6-0,8
1,5	0,75	3,0	1,5	1,6-2,1	0,8-1,05

Из таблицы 2 видно, что данный метод позволяет сохранить прочностные характеристики, так как кабель практически по всей длине остается неизменным, а инерционность снижена за счет переменного сечения в зоне рабочего спая. Это позволит повысить надежные характеристики в ракетно-космической технике.

Выводы

Переменное сечение и получение участка уменьшенного сечения в рабочей части позволяет:

- 1) Сохранить прочностные характеристики термопарного кабеля;
- 2) Уменьшить инерционность в 2 раза;
- 3) Изготавливать термопары переменного сечения по всей длине.
- 4) Предлагаемая зависимость позволяет сохранить прочностные характеристики, использовать термопарные кабели разных диаметров и решить проблему, связанную с получением высокопрочного термопарного кабеля с пониженной инерционности.
- 5) Повысить надежность в авиационной и ракетно-космической технике.

Литература

1. Алякринский Б.С., Андриянов В.В. и др. Космонавтика: Энциклопедия // М.: Сов. Энциклопедия, 1985. С. 528.
2. Бирюков Г.П., Кукушкин Ю.Ф., Торпачев А.В. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов // М: МАИ, 2002. С.264.
3. ГОСТ 23847-79. Преобразователи термоэлектрические кабельные типов КТХАС, КТХАСп, КТХКС. Технические условия // М: Изд-во стандартов. 1986. С. 30.
4. Данишевский С.К., Сведе-Швец Н.И. Высокотемпературные термопары // М.: «Металлургия», 1977. С. 232.
5. Лысиков Б.В., Прозоров В.К., Васильев В.В. и др. Температурные измерения в ядерных реакторах // М.: Атом издат, 1975. С. 168.
6. Метотехника: Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство [Электронный ресурс]. URL: https://www.metotech.ru/art_termopary_4.htm (дата обращения: 14.03.2019).
7. Сучков В.Ф. и др. Жаростойкие кабели с магнизиальной изоляцией. 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Энергоатом издат., 1984. С. 120.

8. Филиппович П.А. Метод получения малоинерционного высокопрочного термомпарного кабеля // Информационно-технологический вестник, 2017. № 3(13). С. 79-84.
9. Шарапов В.М., Полищук Е.С. и др. Датчики: Справочное пособие // Под общ.ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука // М.: Техносфера, 2012. С. 624.
- 10.

УДК 621.391.26

Синтез оптимального сигнала передатчика, обеспечивающего максимальную помехоустойчивость аппаратуры авиационно-космических радиосистем при воздействии комплекса помех

С.Д. Храпов, аспирант,
А.В. Струкова, аспирант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с синтезом оптимального сигнала передатчика, обеспечивающего максимальную помехоустойчивость аппаратуры авиационно-космических радиосистем при воздействии комплекса помех. Рассмотрена задача отыскания сигнала, оптимального для обнаружения в негауссовской помехе. Проанализированы критерии выбора сигналов и накладываемые на них условия. Рассмотрены вариационные принципы синтеза сигналов. Приведены примеры решения задач синтеза передаваемых сигналов.

Авиационно-космические радиосистемы, максимальная помехоустойчивость аппаратуры приема сигналов, негауссовские помехи, квазидетерминированные колебания, синтез оптимального сигнала.

**Synthesis of optimal transmitter signal,
providing the maximum noise immunity of the equipment of aviation
and space radio systems under the influence of a complex of noise**

S.D. Khrapov, post-graduate student post-graduate student,
A.V. Strukova, post-graduate student,

State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The questions related to the synthesis of the optimal signal of the transmitter providing the maximum mechanical stability of the equipment of aerospace radio systems under the influence of a complex of noise are considered and analyzed. The problem of finding the optimal signal for detection in non-Gaussian interference is considered. The criteria for the selection of signals and the conditions imposed on them are analyzed. Considered variational principles of synthesis signals. Examples of solving problems of synthesis of transmitted signals are given.

Aerospace radio systems, maximum noise immunity of signal receiving equipment, non-Gaussian noise, quasi-deterministic oscillations, synthesis of the optimal signal.

Введение. Как известно, первая сторона проектирования систем связи,

является синтез оптимального алгоритма приема. Вторая, не менее важная, заключается в синтезе (выборе) такого сигнала, который бы обеспечивал максимальную помехоустойчивость при действии априорного комплекса помех [1-5]. Будем считать такой сигнал оптимальным, а задачу отыскания передаваемого сигнала, при условии, что прием для подбираемого сигнала все время остается оптимальным – синтезом оптимального сигнала [6-8]. Таким образом, достигается некоторая оптимизация линии связи в целом, так как наряду с оптимизацией приемника осуществляется и оптимизация передатчика.

Задача отыскания сигнала, оптимального для обнаружения в негауссовской помехе. В общем случае задача отыскания сигнала, оптимального для обнаружения в негауссовской помехе, может быть сформулирована следующим образом [7].

1. Представим негауссовскую произвольного вида помеху $n(t)$, воспользовавшись полигауссовским представлением случайных процессов, моделью с δ – коррелированными компонентами, различающимися средними $m_n(t)$, то есть

$$n(t) = \sum_{n=1}^N q_n N[m_n(t), \sigma^2], n = 1, N, 0 \leq t \leq T;$$

$$m_n(t) = \sum_{k=1}^{K_n} m_{nk} \Psi_k(t),$$

где использовано разложение средних каждой компоненты полигауссовской модели в ряд по системе ортогональных функций $\{\Psi_k(t)\}$.

Здесь K_n определяет размерность описываемого колебания.

2. Искомый сигнал $s(t)$ также будем искать в виде его разложения:

$$s(t) = \sum_k s_k \Psi_k(t), 0 \leq t \leq T$$

3. Можно показать, что для того, чтобы ошибка приема была минимальной, сигнал с коэффициентами разложения s_k должен быть ортогональным соответствующим средним $m_n(t)$, то есть определяться системой уравнений

$$\sum_{k=1}^{K_n} s_k m_{nk} = 0, n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Решая систему (1), найдем оптимальный сигнал с размерностью (базой) K_n .

Если известны производственно-эксплуатационные факторы аппаратуры авиационно-космических радиосистем, ограничивающие допустимую базу сигналов, то оценить величину K_n можно следующим образом:

$$\max K_n \leq \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \times \frac{2\Delta F}{\Delta f} \times \frac{T}{\Delta t},$$

где $\Delta\varphi$, Δf , Δt – соответственно, разрешающая способность приемной и передающей аппаратуры по фазе, частоте и времени; 2π , $2\Delta F$ и T – пределы изменения этих параметров.

Затем, используя полигауссовскую аппроксимацию помехи [8], с ограниченным числом компонент с не более чем заданной размерностью $K_{n,\max}$ средних и с не более чем заданной сложностью корреляционных операторов, можно отыскать условно-оптимальный сигнал, то есть оптимальный сигнал со сложностью не выше заданной.

Критерии выбора сигналов. Как правило, в задачах построения систем обнаружения сигналов, исходят из условия минимума среднего риска R , который определяется матрицей плат за ошибки, априорными вероятностями наличия P_1 и отсутствия P_0 сигнала, способом обработки входного колебания $f[y]$ и ПРВ

входного колебания при наличии сигнала $W\left(\frac{y}{s}\right)$ и его отсутствии $W\left(\frac{y}{0}\right)$.

В предположении оптимального приема, на этапе синтеза сигнала, минимизировать средний риск можно только за счет соответствующего выбора ПРВ $W\left(\frac{y}{s}\right)$, так как только эта величина зависит от сигнала.

Можно показать, что минимум среднего риска будет достигаться при максимизации разности между $W\left(\frac{y}{s}\right)$ и $W\left(\frac{y}{0}\right)$. Тогда, критерий выбора сигнала может быть сформулирован в виде требования максимизации величины

$$T_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \left[W\left(\frac{y}{s}\right) - W\left(\frac{y}{0}\right) \right]^2 dy, \quad (2)$$

что может быть достигнуто соответствующим выбором сигнала s .

Условие (2) эквивалентно минимизации соотношения

$$T_s = \int_{-\infty}^{\infty} W\left(\frac{y}{s}\right) W\left(\frac{y}{0}\right) dy. \quad (3)$$

Основная особенность критериев (2) и (3), точно так же как и других различных критериев качества обнаружения, состоит в том, что все они являются некоторыми функциями квадратичной формы

$$K_s = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} s(t_1) H(t_1, t_2) s(t_2) dt_1 dt_2, \quad (4)$$

где $s(t)$, $H(t_1, t_2)$ – функция, определяемая по корреляционной функции аддитивных помех $R(t_1, t_2)$ и импульсной переходной характеристике канала связи $h(\tau)$ из соотношения

$$H(t_1, t_2) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h(\tau_1 - t_1) \theta(\tau_1, \tau_2) h(\tau_2 - t_2) d\tau_1 d\tau_2,$$

Функция $\theta(\tau_1, \tau_2)$ определяется из уравнения

$$\int_0^{\infty} \theta(\tau_1, \tau_2) R(\tau_2, \tau_3) d\tau_2 = \delta(\tau_1 - \tau_3),$$

где $\delta(\tau_1 - \tau_3)$ – дельта-функция.

При негауссовских аддитивных помехах, представленных смесью гауссовских случайных процессов, квадратичная форма (4) входит как слагаемое в функционал качества и, таким образом, хотя и не полностью, определяет его.

Условия накладываемые на сигнал. Условием физической реализуемости сигнала $s(t)$ является конечность его энергии \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} [s(t)]^2 dt. \quad (5)$$

При выборе сигнала, кроме обязательного и важнейшего условия (5), очень часто учитывают требования заданных полосы частот $2\Delta\omega$ и длительности сигнала T .

Наиболее часто в теории сигналов используются определения длительности сигналов путем непосредственного указания интервалов времени $[0, T]$ или в форме эффективной длительности

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^2 [s(t)]^2 dt = T. \quad (6)$$

Аналогично указывается ширина полосы $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ или эффективной полосы

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |s(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} [s'(t)]^2 dt = 2\Delta\omega. \quad (7)$$

Очень важное, с технической точки зрения, требование ограниченности изменения амплитуды сигнала

$$|s(t)| \leq C, C = \text{const},$$

непосредственно использовать нельзя.

Его приходится формулировать, например, в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} [rs(t)]^{2n} dt = \int_{-\infty}^{\infty} [s(t)]^2 dt, \quad n = 2, 3, 4 \dots, \quad r = \text{const}, \quad (8)$$

и, подбирая величину r и показатель n , достигают требуемого пик-фактора, то есть отношения максимальной (пиковой) мгновенной мощности сигнала и его минимальной мгновенной мощности.

Вариационные принципы синтеза сигналов. Как уже было отмечено, функционал качества системы обнаружения зависит от квадратичной формы (4), поэтому синтез оптимального сигнала сводится к отысканию ее экстремума. Кроме того, на сигнал накладываются дополнительные условия вида

$$F_i[s] = \int_{-\infty}^{\infty} F_i[s(t), s'(t)] dt, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где s' – производная по времени.

В терминах вариационного исчисления все сказанное формулируется как задача отыскания условного экстремума функционала (4) с интегральными связями (9), которая решается следующим образом.

В начале, составляется новый функционал

$$J_s = K_s + \sum_i l_i F_i[s, s'], \quad (10)$$

где l_i – множитель Лагранжа.

После чего, исходя из необходимого условия достижения функционалом (10) экстремума при обращении в нуль его первой вариации

$$\delta_1 J_s = 0,$$

получается уравнение Эйлера

$$\int_0^{\infty} s(t_1) H(t_1, t_2) dt_1 + \sum_i l_i \left[\frac{\partial}{\partial s} F(s) \right] - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial}{\partial s'} F[s, s'] \right] = 0. \quad (11)$$

Затем проверяется, является ли данный экстремум максимумом. Для этого необходимо, чтобы вторая вариация $\delta_2 J_s$ была меньше нуля, что может быть достигнуто подбором знаков постоянных коэффициентов l_i .

После этого, решается уравнение (11), которое, как правило, представляет собой линейное однородное интегро-дифференциальное уравнение с переменными параметрами.

Полученное решение определяет форму оптимального сигнала $s(t)$.

Решение задач синтеза сигналов передатчика. Рассмотрим, в качестве примеров, решения некоторых задач синтеза сигналов передатчика.

Пусть на передаваемый сигнал воздействует дельта-коррелированные помехи, то есть помехи типа «белого шума» со спектральной плотностью N_0 , $R(t_1, t_2) = N_0(t_1 - t_2)$ и $h(\tau) = \delta(\tau)$. При наложении условий (5) – (7) получаем уравнение

$$s''(t) + \frac{1}{l_2} \left(\frac{1}{N_0} - l_1 \right) s(t) + \frac{l_3}{l_2} t^2 s(t) = 0,$$

которому отвечают сигналы Эрмита (рисунок 1).

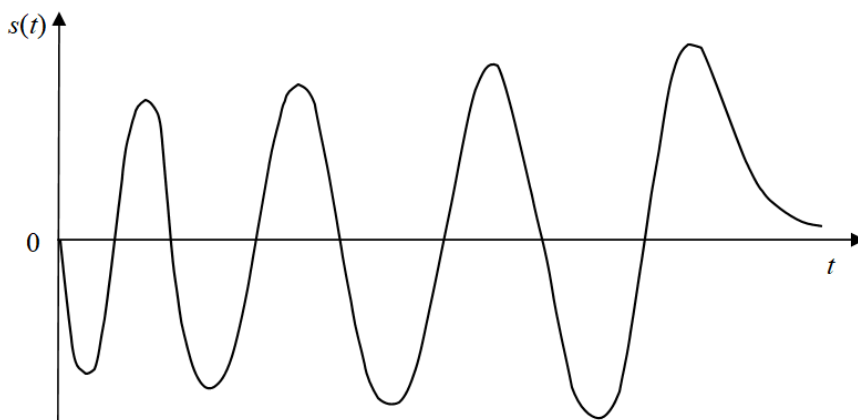


Рисунок 1 – Сигнал Эрмита

Эти сигналы обладают замечательным свойством круговой симметрии тела неопределенности, что обеспечивает в радиолиниях независимость ошибок при одновременной оценке дальности и скорости движения лоцируемого объекта.

При наложении на сигнал заданных требований по энергии (5), полосы частот (7) и пикового значения (8) получается уравнение

$$s''(t) + l_1 s(t) - l_3 s^3(t) = 0, 0 \leq t \leq T, n = 2,$$

приводящее к сигналам имеющих вид функций эллиптического синуса (рисунок 2).

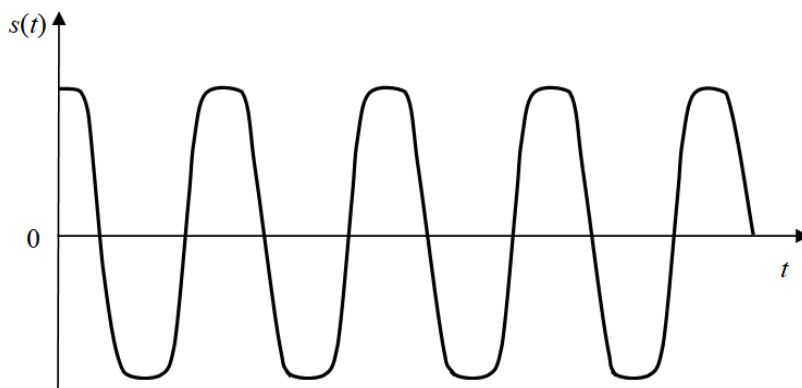


Рисунок 2 – Сигнал с ограниченным пик-фактором

Из графика этой функции видно, что по сравнению с обычной гармоникой этот сигнал имеет более плоскую вершину, что вызвано ограничением амплитуды колебания, заданным пик-фактором.

При воздействии на передаваемый сигнал экспоненциально-коррелированных помех $R(t_1, t_2) = \sigma^2 \exp\{-\alpha|t_1 - t_2|\}$, $h(\tau) = \delta(\tau)$ и введении условий на заданные величины энергии и эффективной длительности, приходим к уравнению

$(l_1 + l_2 t^2)s''(t) + 4l_2 t s'(t) + (2l_2 + \sigma^2 - l_1 \alpha^2 - l_2 \alpha^2 t^2)s(t) = 0$,
при решении которого получается форма сигнала, представленная на рисунке 3.

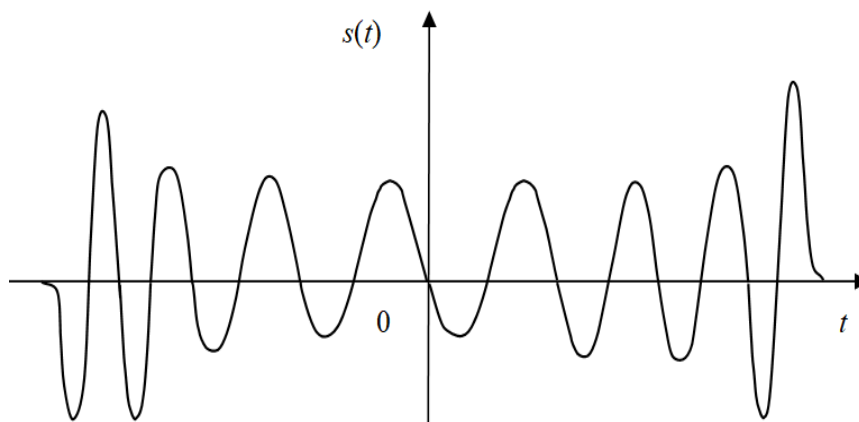


Рисунок 3 – Оптимальный сигнал при воздействии экспоненциально-коррелированных помех

Выводы. Таким образом, рассмотрен алгоритм, позволяющий осуществить синтез (выбор) такого сигнала передатчика аппаратуры авиационно-космических радиосистем, который бы обеспечивал максимальную помехоустойчивость при действии априорного комплекса помех.

Рассмотрены критерии выбора сигналов. Показано, что в задачах построения систем обнаружения сигналов, исходят из условия минимума среднего риска, который определяется матрицей плат за ошибки, априорными вероятностями наличия и отсутствия сигнала, способом обработки входного колебания и плотностью распределения вероятностей входного колебания при наличии сигнала и его отсутствии. На этапе синтеза сигнала, в предположении оптимального приема, минимизировать средний риск можно только за счет соответствующего выбора плотности распределения вероятностей входного колебания, при наличии сигнала.

Рассмотрены вариационные принципы синтеза сигналов, а также условия, накладываемые на сигнал. Приведены решения задач синтеза сигналов передатчика для некоторых частных случаев.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Измерение информационных параметров сигнала в условиях воздействия аддитивных негауссовских коррелированных помех // Автометрия, 2016. Т. 52. № 6. С. 22-28.
2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ влияния аддитивных негауссовских помех на точность измерения параметров движения в радиосистемах ближнего действия // Нелинейный мир, 2015. Т. 13. № 1. С. 16-30.
3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей информационных параметров сигналов, обрабатываемых

- радиолокационными устройствами наблюдения ближнего действия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2014. № 5. С. 14-20.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Нелинейное оценивание параметров сигнала при воздействии узкополосных негауссовских помех // Автометрия, 2019. Т.55, № 1. С.80-88.
 5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Описания сигналов и помех в радиопереносных авиационно-космических радиосистемах с помощью полигауссовских моделей // Информационно-технологический вестник, 2018. № 4 (18). С.3-12.
 6. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств // М.: Сов. радио, 1975.
 7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники // М.: Сов. Радио, 1974. 552 с.
 8. Трофимов А.Т., Чебдаров Ш.М. О выборе сигналов для дискретных систем связи, подверженных действию комплексных помех. В кн.: Прием и обработка информации в сложных информационных системах, вып.6. // Казань: Изд-во Казанского университета, 1978.

УДК 004.5

Развитие виртуальных инструментов для создания цифровых двойников

Т.С. Аббасова, кандидат технических наук, доцент
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Проанализированы тенденции развития виртуальных измерительных приборов и систем, на основе анализа концептуальной модели раннего компьютеризированного приборостроения и схемы процесса измерения с помощью программных и аппаратных средств разработана общая концептуальная модель виртуального инструмента; описана типовая схема технологии создания цифрового двойника; даны рекомендации по отработке изделий с помощью цифровых двойников; приведена конкретная цифровая модель телекоммуникационного шкафа и даны рекомендации по ее использованию.

Виртуальные измерения, модели цифровых двойников, цифровые испытания.

The development of virtual tools for creating digital doubles

T.S. Abbasova, Ph.D. assistant professor,
State Educational Institution of
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The trends of the development of virtual measuring instruments and systems are analyzed; an overall conceptual model of a virtual instrument has been developed on the basis of an analysis of the conceptual model of early computerized instrumentation and the measurement process diagram using software and hardware; describes the typical scheme of creating a digital twin; recommendations for the development of products using digital twins; The specific digital model of the telecommunication cabinet is given and recommendations on its use are given.

Virtual measurements, digital twin models, digital tests.

В течение многих лет электронные инструменты для измерения параметров и мониторинга состояния различных устройств и систем варьировались в размерах и функциональности, обычно они выполнялись в форме коробчатых объектов с панелью управления и дисплеем. Широкое распространение персональных компьютеров (ПК) дало ученым и инженерам новый способ проведения виртуальных измерений и экспериментов [1 – 3]. В связи с внедрением технологии «цифровых двойников» актуально совершенствование виртуальных измери-

тельных систем для более точной отработки виртуальных аналогов реальных устройств, изделий и процессов.

Результаты исследования

Одно из основных событий, вытекающее из повсеместности ПК – это концепция виртуальных измерений. Виртуальный измерительный прибор (инструмент) состоит из стандартного компьютера или рабочей станции и оснащен стандартным прикладным программным обеспечением, экономически эффективным оборудованием, например, съемные платы, драйверы программного обеспечения, которые совместно выполняют функции традиционных электронных инструментов измерения. Сегодня использование виртуальных инструментов и сотен тысяч приложений к ним инженерами и учеными по всему миру приводит к более быстрому применению разработки, повышению качества продукции и снижению затрат. Виртуальные инструменты представляют собой фундаментальный сдвиг от традиционных аппаратно-ориентированных измерительных систем к программно-ориентированным системам, которые используют вычислительные ресурсы популярных настольных ПК и рабочих станций. Хотя за последние два десятилетия технологии ПК и интегральных микросхем значительно улучшились, необходимо развитие программного обеспечения, которое делает возможным создание виртуальных инструментов на этой основе. Инженеры и ученые больше не ограничены традиционными инструментами с фиксированной функцией. Теперь они могут создавать системы измерения и автоматизации, которые точно соответствуют их конкретным потребностям.

В таблице 1 приводятся сравнительные характеристики контрольно-измерительной аппаратуры, выполненной по традиционной и виртуальной технологиям.

Основные особенности, характеризующие новые направления в создании информационных измерительных систем, основанных на виртуальных измерениях, в сравнении с традиционными, приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики традиционной и виртуальной измерительной аппаратуры

Традиционная технология, определяемая изготовителем	Виртуальная технология, определяемая пользователем
Функционально-специфична, отдельно расположенные приборы с ограниченной способностью подключения	Прикладная система с возможностью подключения к компьютеру, сетям, периферийным устройствам
Основное – аппаратные средства	Основное – программное обеспечение
Закрытая система с фиксированными функциональными возможностями	Открытая система с гибкими функциональными возможностями, компьютерная техника
Медленно развивающаяся технология (цикл жизни 5–10 лет)	Быстро развивающаяся технология (цикл жизни 1–2 года)
Высокие затраты на разработку и эксплуатацию	Программное обеспечение минимизирует затраты на разработку и эксплуатацию, дает возможность многократного использования

Таблица 2 – Характеристики традиционных и виртуальных измерительных систем

Характеристика	Традиционный подход	Новый подход
Аппаратная поддержка	Обычный прибор	Виртуальный прибор
Окружение	Текстовое	Графическое
Синтаксис языка измерительного программирования	Текстовый	Графический
Тип управления выполнением процедуры	Последовательное управление	Управление потоками данных
Стиль программирования	Процедурно - ориентированный	Объектно-ориентированный

Процесс измерения состоит из трех частей, как показано на рисунке 1, – сбор данных или сигналов измерений, подготовка и обработка результатов анализа измерений сигналов и представление данных. Концепция виртуального инструмента часто используется в промышленной измерительной практике, но не всегда с точно таким же смыслом. Для некоторых людей виртуальные инструменты основаны на стандартных компьютерах и представляют собой системы для хранения, обработки и представления данных измерений. Для других виртуальный инструмент – это компьютер, который оснащен программным обеспечением для различных целей, включая драйверы для различных периферийных устройств, а также аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, представляющие альтернативу дорогим обычным инструментам. Оба мнения более или менее правильны. Сбор данных с помощью компьютера может быть достигнуто различными способами и по этой причине понимание архитектуры измерительного прибора становится важным. Виртуальный инструмент может быть определен как интеграция датчиков с помощью ПК, оборудованного специальным аппаратным и программным обеспечением для сбора данных, позволяющая получать данные измерений для обработки и представления (презентации). Виртуальный инструмент может заменить традиционную фронт-панель, оснащенную кнопками.

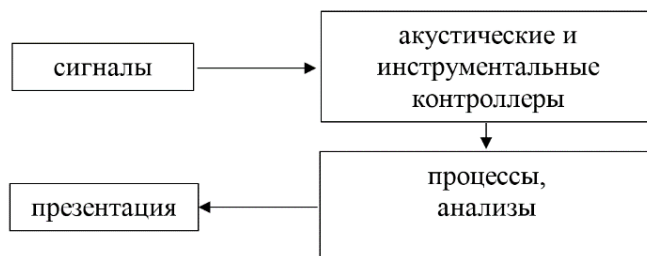


Рисунок 1 – Концептуальная модель раннего компьютеризированного Приборостроения

Производители электронных инструментов обеспечивают определенные функции для данной архитектуры и фиксированных интерфейсов измерительных устройств, и, таким образом, ограничивают область применения этих устройств. При фактическом использовании требуется много времени для настройки диапазона измерений и для сохранения и документирования результатов. Появление

микропроцессоров в измерении и виртуальных приборов обусловило быстрые модификации технологий измерительных приборов, вскоре за появление компьютерных методов измерения. Один пользователь контролирует систему, которая работает исключительно на аппаратном обеспечении. Есть единый контроль структуры, которая формируется комбинацией пользователя, и программа, которая управляет несколькими устройствами, подключенными к шине контрольно-измерительного прибора.

Виртуальные инструменты являются средством интеграции отображения, управления и централизации сложных измерительных систем, как показано на рисунке 2.

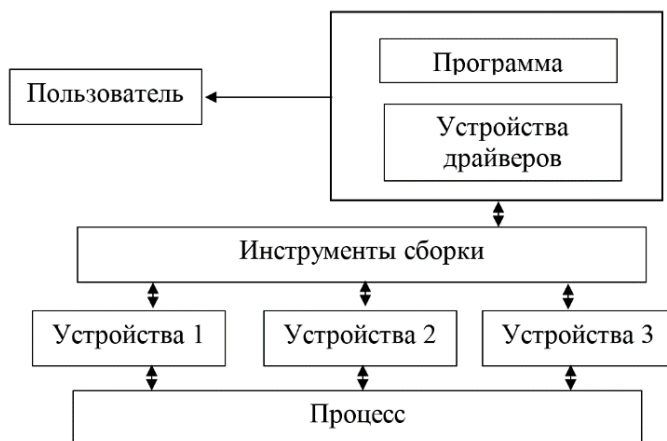


Рисунок 2 – Схема процесса измерения с помощью программных и аппаратных средств

При создании виртуального инструмента необходимо объединить элементы аппаратного и программного обеспечения для выполнения сбора и контроля данных, их обработки и представления в различных формах, максимально использовать возможности ПК. Общая концепция виртуального контрольно-измерительного прибора представлена на рисунке 3.

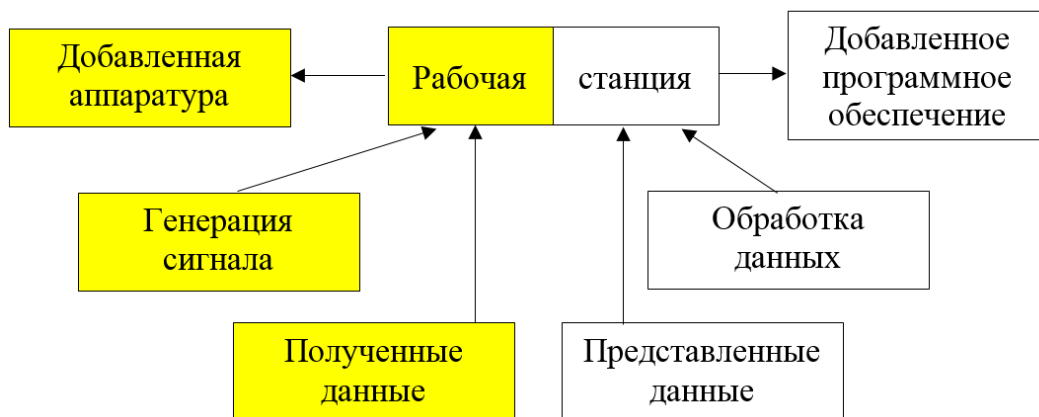


Рисунок 3 – Общая концептуальная модель виртуального инструмента

Основные категории виртуальных инструментов:

1) графическая лицевая панель на экране компьютера для управления модулями или приборами;

2) графическая передняя панель без физических инструментов на все подключения к компьютеру; компьютер получает и анализирует данные из файлов или из других компьютеров в сети, или он может даже рассчитать его данные математически для имитации физического процесса или событие, а не получение реальных данных реального мира. К соединениям ПК согласно пункту, подключены следующие измерительные приборы процесса: датчики, серийные инструменты. Эта структура является результатом международной стандартизации. Она предоставляет больше свободы в использовании досок и инструментов от разных производителей. Основные характерные особенности виртуальных инструментов, описывающие их функциональность: расширение функциональности традиционных инструментов персонального компьютера; открытые архитектуры инструментов; широкое признание и внедрение систем разработки программного обеспечения для виртуальных инструментов.

Основные компоненты всех виртуальных инструментов включают в себя компьютер и дисплей, виртуальный инструмент программного обеспечения, структуру шины (которая соединяет компьютер с оборудованием прибора) и оборудование прибора.

Если компьютер является сердцем виртуального инструмента системы, программное обеспечение является их мозгом. Программное обеспечение однозначно определяет функциональность и индивидуальность виртуальной приборной системы. Большая часть программного обеспечения предназначена для работы в отраслевых операционных системах на персональных компьютерах и рабочих станциях. Программное обеспечение может быть разделено на несколько уровней, которые могут быть описаны в иерархическом порядке.

С помощью простых в использовании интегрированных инструментов разработки инженеры-проектировщики могут быстро создавать, настраивать и отображать измерения в удобной для пользователя форме, во время разработки продукта и его проверки. Наиболее широко применяются следующие виртуальные измерительные инструменты:

- LabVIEW (лаборатория Virtual Instrument Engineering Workbench) – это высокопроизводительный язык графического программирования для построения систем сбора данных и измерительных приборов. Чтобы определить функциональные возможности системы, можно интуитивно собрать структурные схемы – естественная схема проектирования для инженеров. Его тесная интеграция с измерительным оборудованием быстрое развитие сбора данных, анализа и представления решений.

- LabWindows / CVI (C для виртуальных инструментов) – это основанное на Windows, интерактивное программирование ANSI C среда, предназначенная для создания приложений виртуального приборостроения. Он предоставляет редактор перетаскивания для создания пользовательских интерфейсов, полная среда ANSI C для построения логики тестовой программы, а также набор инструментов для автоматической генерации кода, а также утилиты для построения автоматизированных тестовых систем и приложений мониторинга лабораторных

экспериментов. Основные функции CVI заключаются в использовании набора библиотек [3].

- HP VEE (среда визуального проектирования Hewlett-Packard) – позволяет графическое программирование для измерительных приложений. Это вид визуальной инженерии среда, знаковый язык программирования для решения инженерных задач. Это также дает возможность собирать, анализировать и отображать данные без (текстовое) программирования.

- Measurement Studio – инструмент измерения данных приобретение, анализ, визуализация и подключение к Интернету. Этот инструмент разработки поможет вам создать свой тест система путем интеграции в существующий компилятор Microsoft. Measurement Studio предоставляет набор элементов управления и классов, предназначенных для построения виртуальных измерительных систем внутри Visual Basic или Visual C ++ и C. В Measurement Studio можно настроить подключаемые платы сбора данных, инструменты GPIB и последовательные устройства со страниц свойств без написания кода. С компоненты пользовательского интерфейса вы можете настроить в режиме реального времени 2D и 3D-графики, ручки, метры, датчики, циферблаты, баки, термометры, бинарные переключатели и светодиоды. С помощью мощных интернет-компонентов вы можете обмениваться данными измерений в режиме реального времени. среди приложений через интернет.

Современная тенденция во взаимосвязанных измерительных системах заключается в расширении области, охватываемой этими системами в географическом масштабе. Это устанавливает дополнительный предел для использования таких систем. Как и в случае крупных и сложных установок, структурированная сетевая измерительная система может быть путем масштабирования использована в географической области. Географические области, подлежащие мониторингу и контролю, делятся на ячейки, с которыми может работать один блок обработки или группа локально связанных блоков. Географически распределенные блоки связаны географической компьютерной сетью в распределенную систему измерений. В этом случае существует задержка в передаче и обработке данных, нельзя этим пренебрегать. Минимизация задержек передачи данных еще более актуальна, если трафик в компьютерной системе является очень значительным из-за количества подключенных компьютеров. Похоже, что в ближайшее время локальную сеть (LAN) можно рассматривать как своего рода измерительную шину, с точки зрения систем измерения и контроля.

В последние несколько лет наблюдается рост быстрых и надежных систем связи, которые позволяют осуществить обмен информацией и командами между компьютерами, подключенными к локальным сетям, и компьютерами, подключенными на дальний сайт глобальных сетей (WAN), например, Интернет. Таким образом, сетевые сервисы и программируемые измерительные приборы теперь позволяют создавать измерительные лаборатории, распределенные по обширному географическому региону и одновременно доступные нескольким пользователям, расположенным на территории различным образом. Обычное программное обеспечение, работающее в режиме онлайн, может быть использовано для облегчения миграции данных между различными путями коммуникации.

Мультимедийные системы обработки эффективны при создании сложных систем призваны преодолеть ограничения одного компьютера, связанные с общей вычислительной мощностью или количеством сигналов, которые должны быть получены и обработаны. Стандартные языки программирования, такие как С и Java, могут использоваться с готовыми инструментами разработки для реализации приложения встроенных сетевых узлов и веб-приложений соответственно. Интернет/TCP/IP протоколы, технологии Ethernet и/или Data Sockets могут использоваться для проектирования сетевой инфраструктуры. Data Socket – это программная технология для Windows, которая обеспечивает совместное использование всех измерений в сети (удаленно Веб и FTP сайты) так же просто, как запись информации на файл. Он использует URL для адресации данных так же, как мы используем URL в веб-браузере для указания веб-страниц. Data Socket в комплекте с любым программным инструментом идеально подходит, когда кто-то желает завершить контроль измерений, но не хочет изучать тонкости протоколов передачи данных TCP/IP. Во всех типах сетевых и распределенных измерений системы, представленные выше, работа в режиме реального времени и ограничения являются критически важными вопросами, которые необходимо учитывать для обеспечения правильной работы системы.

С распределенной системой измерения можно проводить дистанционные измерения, распределять выполнение программы или публиковать данные измерений через Интернет. Эволюционные аппаратные и программные технологии предоставляют пользователям инструменты, необходимые для легкого построения мощной распределенной системы. Публикуя приложение для измерений или автоматизации через Интернет, можно просматривать данные в реальном времени пользователями на удаленных компьютерах. В средах разработки приложений доступны веб-серверы, так что можно опубликовать пользовательский интерфейс в интернете. Без какого-либо дополнительного программирования можно опубликовать свою лицевую панель в виде веб-страницы, чтобы пользователи через Интернет могли просматривать эти панели, работающие в любом стандартном веб-браузере. Приложения имеют один или несколько узлов измерения физически отделены от компьютера, который контролирует их и собирает данные. Приложения дистанционного измерения часто требуют высокоскоростной потоковой передачи данные и несколько клиентов подключены к одному измерению. Для потоковой передачи данных измерений по сети DataSocket предоставляется простой в использовании интерфейс.

В настоящее время актуальна разработка цифровых двойников устройств (изделий, систем, процессов) с помощью виртуальной технологий создания. Цифровой двойник – это компьютерная модель (КМ), которая является аналогом физического устройства и отображает внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального устройства в условиях воздействий помех и окружающей среды. Типовая схема технологии создания цифрового двойника приведена на рисунке 4.

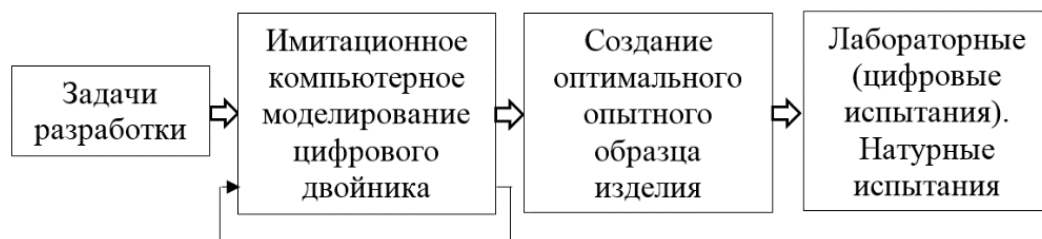


Рисунок 4 – Схема разработки и проверки цифрового двойника изделия

Лабораторные (цифровые) испытания цифровых двойников реализуются с помощью виртуальных экспериментов. Для их приближения к реальным экспериментам актуальна постановка задачи разработки виртуального лабораторного комплекса на основе метода многоуровневого компьютерного моделирования [4]. На рисунке 4 [5] представлены уровни компьютерной модели для проведения виртуальных экспериментов.



Рисунок 5 – Типовая структура многоуровневой компьютерной модели цифрового двойника изделия

Сначала может быть проведена отработка цифрового двойника, затем – по результатам виртуальных экспериментов – отработка реального устройства на основе двойника. После выполнения тысяч (десятков тысяч) виртуальных испытаний нового изделия (объекта, системы) можно приступить к натурным испытаниям. До проведения натурных испытаний обязательно учесть все особенности

новой разработки и ее реализации в цифровом виде, то есть с помощью «цифрового двойника».

Однако возможно использование цифрового двойника при реально функционирующем устройстве. Для задания на двойник входных воздействий используется информация с датчиков реального устройства, работающего параллельно.

Как правило, техническое устройство трехмерно, поэтому на основе компьютерных 3D-моделей разрабатываются цифровые трехмерные двойники.

Технологии «цифрового двойника» применяются для оптимизации состояния и повышения помехозащищенности оборудования инфокоммуникационных систем. Пример цифрового двойника коммутационного оборудования приведен на рисунке 6.

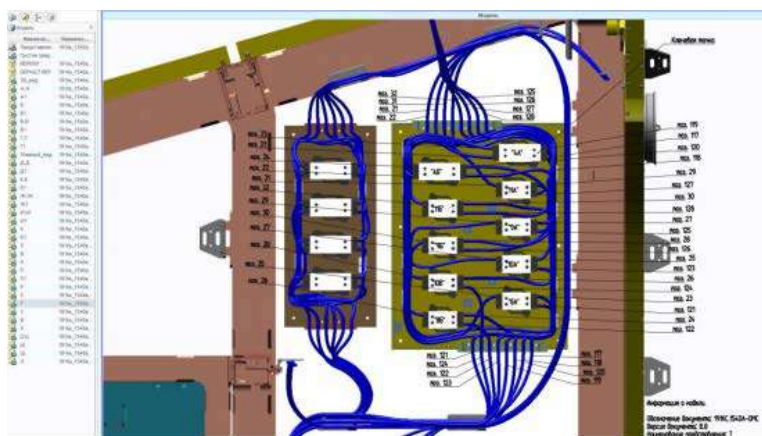


Рисунок 6 – Цифровой двойник телекоммуникационного шкафа с соответствующими аннотациями и представлениями

С помощью модели «цифрового двойника» телекоммуникационного шкафа, приведенной на Рисунке 6, можно осуществить виртуальный монтаж кабелей и патч-кордов внутри шкафа с учетом минимально допустимых расстояний между ними.

Виртуальные приборы питают постоянно развивающимися компьютерные технологии, и это дает возможность создавать системы «цифровых двойников» на основе открытых фреймворков. Сочетание производительности компьютера, графического программного обеспечения и модульных инструментов привели к появлению виртуальных инструментов, которые существенно отличаются от своих физических предков. Виртуальные инструменты проявляются в разных формах – от графических приборных панелей до комплектного прибора системы. Модульные строительные блоки инструментов становятся все более распространенными в отрасли и позволяют развивать возможности, недоступные с использованием традиционных инструментальных архитектур. Применение нейрокompьютеров для виртуальных измерений и цифровых двойников имеет большие перспективы.

Выводы

Тенденция в виртуальном приборостроении все больше объединяет измерительные системы в более сложные системы мониторинга и управления, распределенные по разным (возможно, географически удаленным) местам. Удаленное управление измерительными приборами становится популярным, так как сети стали надежными и широко распространенными по всему миру. С введением технологии «цифровых двойников» виртуальные измерительные средства объединяются в виртуальные измерительные системы и используются для лабораторных (цифровых) испытаний.

Литература

1. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С., Аббасов А.Э. Условия эффективного применения виртуальных лабораторий для инженерного образования: сб. тр. по материалам II-ой международной научно-практической Интернет-конференции «Инновационные технологии в современном образовании» 19.12.2014 // Королев МО. Финансово-технологическая академия, ФТА: Изд-во «Алькор Паблишерс». 2015. С. 12–19 (456 с.).
2. Пец А.В. Виртуальные приборы – инструмент исследования двух реальностей // Вести. БФУ им. Канта, 2013. № 10. С. 144–146.
3. Акимкина Э.Э. Инструментальные средства анализа данных в информационно-управляющих системах // Современные информационные технологии: сборник трудов по материалам 3-ей межвузовской научно-технической конференции с международным участием 29 сентября 2017 г. / колл. авторов; под общ. науч. ред. док. техн. наук, проф. В. М. Артюшенко // М. Издательство «Научный консультант», 2017. С. 61–66 (190 с.).
4. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. 2013. № 2(36). С. 24–36.
5. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Панов С.А. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов // Программные продукты и системы, 2016. № 3(29). С. 154–161.

УДК 620.92

**Алгоритм оптимального распределения ограниченных ресурсов
на основе метода игровых итераций**

В.Я. Вилисов, доктор экономических наук, кандидат технических наук,
профессор кафедры «Математики и естественнонаучных дисциплин»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье предложен алгоритм решения задачи линейного программирования (ЗЛП) на основе использования ее представления в виде антагонистической матричной игры и последующего решения игры итерационным методом. Алгоритм реализован в виде компьютерной программы. Проведены исследования скорости сходимости оценок решения к фактическому значению с необходимой точностью. Программная реализация показывает высокую скорость получения решения ЗЛП с приемлемой точностью за доли или единицы секунд. Это позволяет использовать алгоритм во встраиваемых системах для оптимального управления.

Линейное программирование, матричные игры, итерационный алгоритм, встраиваемые системы управления.

**Algorithm for optimal allocation of limited resources based on the game
iteration method**

V.Ya. Vilisov, D.Sc., Ph.D., Professor of the Department «Mathematics and Natural
Sciences»,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article proposes an algorithm for solving a linear programming problem (LPP) based on the use of its representation in the form of an antagonistic matrix game and the subsequent solution of the game by an iterative method. The algorithm is implemented as a computer program. The rate of convergence of the estimates of the solution to the actual value with the required accuracy has been studied. The software implementation shows a high speed of obtaining the LPP solution with acceptable accuracy in fractions or units of seconds. This allows the use algorithm in embedded systems for optimal control.

Indemnification, emergency situations, fires, insurance.

Задача распределения ограниченных ресурсов встречается очень часто в самых различных прикладных областях. Обычно выбор оптимального управления в современных системах управления происходит с некоторой периодичностью или как реакция на те или иные события. Большое количество ситуаций

выбора оптимальных управлений может быть представлено в виде задач математического программирования, из которых значительную долю составляют задачи линейного программирования (ЗЛП).

Среди методов оптимального управления и/или оптимального распределения ограниченных ресурсов ЗЛП занимает особое место т.к. к ней могут быть сведены многие прикладные задачи, по форме изначально мало похожие на ЗЛП, такие, например, как управляемые марковские цепи [8], транспортная задача [2, 12], задача о назначениях [12], матричные игры [9, 10] и др. Прикладные сферы для решения этих задач также весьма разнообразны, например, управление группами роботов [3], распределение каналов связи в робототехнических системах (РТС), распределение сил и средств при ликвидации чрезвычайных ситуаций, построение оптимальной производственной программы [4] и др.

Основоположник матричных игр Дж. фон Нейман отмечал [9] тесную связь между матричными играми и линейным программированием [5]. Однако на практике широко известны лишь методы решения антагонистических матричных игр путем сведения их к ЗЛП, что позволяет найти решение матричных игр произвольной размерности.

Типовым методом решения ЗЛП является симплекс-метод (в различных модификациях). Однако имеются многочисленные исследования [5], которые показывают, что он не всегда гарантированно сходится к оптимальному решению. Подобным недостатком обладают и другие поисковые методы. Во многом показатели сходимости поисковых методов зависят от данных конкретной прикладной задачи. Эвристические модификации симплекс-метода, например, в MS Excel, обычно и направлены на улучшение сходимости. Кроме того, в числе недостатков этого метода следует отметить громоздкость и неочевидность вычислительных процедур. По сложившейся на сегодня практике, эти недостатки компенсируются квалификацией пользователя, которому, в большинстве современных компьютерных программ оптимизации, предоставлен набор параметров, доступных для варьирования в целях получения приемлемого решения. Однако, попытки реализации упомянутых выше моделей в системах управления реального времени, например, в бортовых компьютерах современных встраиваемых систем управления, приводит к существенному снижению надежности их функционирования. В связи с этим возникает вопрос: а можно ли найти замену «рабочей лошадке» – симплекс-методу?

Предложенный в работе алгоритм является существенно более простым и очевидным, позволяет получить решение с наперед заданной точностью, что дает возможность в каждом конкретном приложении находить компромисс между точностью решения и скоростью его вычисления. Предлагаемый метод основан на взаимно-однозначном соответствии ЗЛП и антагонистических матричных игр (АМИ) и назван в работе *методом игровых итераций*. Рассмотрим его основные элементы.

Решение АМИ с помощью ЗЛП

АМИ (игры с нулевой суммой) традиционно [10] решались путем их представления в форме ЗЛП. Суть такого преобразования состоит в следующем. Игра обычно задается платежной матрицей $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{mn}$. Элементы \tilde{a}_{ij} отражают выигрыш *первого игрока* (И1) в каждой партии игры. В силу того, что игра имеет

нулевую сумму, \tilde{a}_{ij} – одновременно отражает и величину проигрыша *второго* игрока (И2). Решить игру означает найти пару оптимальных смешанных стратегий игроков $\bar{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T$, $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$, и цену игры V , которую в векторно-матричной форме можно представить как $V = \bar{p}^T A \bar{q}$. Для элементов векторов \bar{p} и \bar{q} , имеющих смысл вероятностей применения игроками той или иной своей чистой стратегии, должно выполняться условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1. \quad (2)$$

Если И1 применяет свою оптимальную смешанную стратегию, а И2 - любую чистую, то И1, при многократном повторении игры, получит выигрыш не менее цены игры V :

$$\sum_{i=1}^m \tilde{a}_{ij} p_i \geq V; \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Введя обозначение: $\tilde{x}_i \triangleq \frac{p_i}{V}$ и подставив их в (1), получим $\sum_{i=1}^m \tilde{x}_i = \frac{1}{V}$. Цель И1 заключается в максимизации своего среднего выигрыша, т.е. цены игры V , или, что тоже самое, в минимизации величины $\frac{1}{V}$. Здесь *тильдой* помечены элементы матрицы платежей АМИ и переменные ЗЛП, отражающие принадлежность к игровой форме (решению АМИ с помощью ЗЛП). Без тильды будем обозначать переменные типовой формы ЗЛП и соответствующие коэффициенты системы ограничений, не имеющие непосредственного отношения к АМИ. Тогда, с учетом введенных обозначений, после замены переменных в (3), можно записать постановку ЗЛП, полученную из АМИ, в следующей форме:

$$\sum_{i=1}^m \tilde{a}_{ij} \tilde{x}_i \geq 1; \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$L(\tilde{x}) = \sum_{i=1}^m \tilde{x}_i \rightarrow \min_{\tilde{x}_i} \quad (5)$$

Решение этой ЗЛП приведет к следующему решению АМИ для И1:

$$p_i = \frac{\tilde{x}_i}{L_{opt}}; \quad i = \overline{1, m}; \quad V = \frac{1}{L_{opt}}, \quad (6)$$

где L_{opt} – оптимальное значение целевой функции.

Аналогичные построения можно выполнить и для второго игрока (И2), в результате чего получим:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \tilde{y}_j \leq 1; \quad i = \overline{1, m}, \quad (7)$$

$$L(\tilde{y}) = \sum_{j=1}^n \tilde{y}_j \rightarrow \max_{\tilde{y}_j} \quad (8)$$

Эта задача является двойственной ЗЛП по отношению к исходной (4)-(5). Решив ее, получим оптимальное решение игры для И2:

$$q_j = \frac{\tilde{y}_j}{L_{opt}}; \quad j = \overline{1, n}; \quad V = \frac{1}{L_{opt}}, \quad (9)$$

Такова традиционная технология решения АМИ путем перехода к ЗЛП, ее решения и преобразования полученного решения ЗЛП в решение АМИ. При этом предполагается, что существует приемлемый метод решения ЗЛП, в качестве которого обычно выступает симплекс-метод [12]. Далее покажем обратный алгоритм – нахождение решения ЗЛП путем преобразования ее к АМИ, поиска ее решения и обратного преобразования полученного решения АМИ в решение ЗЛП.

Решение ЗЛП с помощью АМИ

Для реализации обратного алгоритма необходимо располагать методом решения матричных игр, *не основанном на ЗЛП*. Таких методов немного: метод Брауна-Робинсон [1, 11], монотонный итеративный алгоритм [6], графический метод решения [12] и др. Наиболее универсальным представляется метод Брауна-Робинсон, который позволяет отыскивать решение для АМИ произвольной размерности. Он является структурно весьма простым, но при больших размерностях платежной матрицы АМИ может потребовать большого объема однотипных вычислений. С ростом вычислительных мощностей компьютеров, в том числе бортовых, этот метод становится весьма привлекательным для решения АМИ. Приведем выкладки, позволяющие представить решение ЗЛП на основе решения эквивалентной ей АМИ. При этом предполагается, что решение АМИ получено без привлечения алгоритмов решения ЗЛП. Такая схема позволяет получить сразу решение как прямой, так и двойственной ЗЛП.

Пусть ЗЛП, которую необходимо решить, представлена в форме задачи на максимум (тогда соответствующая ей двойственная задача может быть представлена задачей на минимум). Существует несколько форм представления ЗЛП [5], которые могут быть взаимно-однозначно преобразованы друг в друга. Далее воспользуемся формой задачи на максимум при ограничениях типа (\leq):

$$L(\bar{y}) = \bar{c}^T \bar{y} = \sum_{j=1}^n c_j y_j \rightarrow \max_{y_j}, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} y_j \leq a_{i0}; \quad i = \overline{1, m}; \quad y_j \geq 0, \quad (11)$$

где $\bar{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n]^T$ – вектор переменных;

$\bar{c} = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n]^T$ – вектор параметров целевой функции;

$A = \|a_{ij}\|_{mn}$ – матрица коэффициентов системы ограничений;

$\bar{a}_0 = \|a_{i0}\|_m = [a_{10} \quad a_{20} \quad \dots \quad a_{m0}]^T$ – вектор свободных членов системы ограничений.

Пусть $c_j > 0, a_{i0} > 0$. Не трудно заметить, что задача (10)-(11) может быть сведена к задаче (7)-(8), если ввести следующие обозначения:

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{i0} c_j}; \quad (12)$$

$$\tilde{y}_j = c_j y_j, \text{ откуда } y_j = \frac{\tilde{y}_j}{c_j}. \quad (13)$$

Задаче (7)-(8) однозначно соответствует матрица платежей $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{mn}$, элементы которой полностью определяются соотношением (12). Таким образом, можно констатировать, что по исходным данным ЗЛП построена АМИ.

Для решения данной АМИ воспользуемся методом Брауна-Робинсон [1, 11], в результате чего получим два вектора оптимальных стратегий и цену игры: $\bar{p} = [p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_m]^T, \bar{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n]^T, V$.

Имея решение АМИ, и воспользовавшись соотношениями (6), (9) и (13), можно получить решение прямой ЗЛП, двойственной ЗЛП и оптимальное значение целевой функции исходной ЗЛП (они одинаковы для прямой и двойственной задач):

$$L_{opt} = \frac{1}{V}; \quad y_j^{opt} = \frac{q_j}{c_j V}; \quad x_i^{opt} = \frac{p_i}{a_{i0} V}, \quad (14)$$

где $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$.

Итак, последовательность шагов, приводящих к решению ЗЛП (10)-(11), включает следующие:

1. Построение платежной матрицы АМИ на основе параметров исходной ЗЛП, путем расчета элементов АМИ по формуле (12).
2. Решение АМИ методом Брауна-Робинсон.
3. Пересчет полученного решения АМИ в решение ЗЛП по формулам (14).

Приведем краткое содержание алгоритма решения АМИ методом Брауна-Робинсон, как основного элемента, хоть и не единственно возможного, *метода игровых итераций* решения ЗЛП.

Метод Брауна-Робинсон

Этот метод решения матричных игр был предложен Г. Брауном [1], а сходимость его к оптимальному (минимаксному) решению доказана Дж. Робинсон [11]. Метод Брауна-Робинсон еще называют *методом фиктивного разыгрывания* или *методом итераций*. Он представляет собой итерационную процедуру, имитирующую многократное повторение партий игры, при этом предполагается, что игроки поочередно выбирают очередную свою чистую стратегию с учетом всей информации о решениях противника в предыдущих партиях игры. Оценки оптимальных смешанных стратегий вычисляются как текущие частоты использования игроками своих чистых стратегий за весь интервал наблюдений, а оценка цены игры – как среднее текущего выигрыша игрока И1 и проигрыша игрока И2. Итерации прекращаются по достижении заданной точности оценок. Приведем формализованное представление этой процедуры.

Пусть два игрока знают все элементы платежной матрицы $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{mn}$. Они разыгрывают некоторое количество партий игры, причем в каждой партии имеют возможность видеть выбираемые противником чистые стратегии. Свои стратегии в каждой партии игроки выбирают наилучшим образом (И1, чтобы максимизировать свой выигрыш, И2, чтобы минимизировать свой проигрыш). При очередном $(t+1)$ -ом выборе каждый игрок учитывает статистику выборов противника за предыдущие t шагов: если И2 использовал свою j -ю стратегию Q_j раз из общего числа t партий, то И1 выбирает свою i -ю чистую стратегию так, чтобы максимизировать среднюю величину выигрыша:

$$i(t+1) = \arg \max_{i=1, m} v_i(t) = \arg \max_{i=1, m} \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{Q_j(t)}{t} = \arg \max_{i=1, m} \sum_{j=1}^n a_{ij} \hat{q}_j(t)$$

Аналогично, если И1 использовал свою i -ю стратегию P_i раз, то И2 выбирает свою j -ю стратегию так, чтобы минимизировать среднюю величину проигрыша:

$$j(t+1) = \arg \min_{j=1, n} v_j(t) = \arg \min_{j=1, n} \sum_{i=1}^m a_{ij} \frac{P_i(t)}{t} = \arg \min_{j=1, n} \sum_{i=1}^m a_{ij} \hat{p}_i(t)$$

Случайные величины $\hat{p}_i(t) = \frac{P_i(t)}{t}$ и $\hat{q}_j(t) = \frac{Q_j(t)}{t}$ представляют собой последовательности оценок элементов векторов смешанных стратегий игроков, сходящие-

ся в пределе (как доказала Дж. Робинсон [11]) к оптимальным смешанным стратегиям. А оценка среднего выигрыша И1 и среднего проигрыша И2, вычисленные с учетом текущих оценок оптимальных смешанных стратегий, сходятся к цене игры:

$$V = \lim_{t \rightarrow \infty} \max_t v_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \min_t v_j(t).$$

Итерационный процесс можно останавливать по достижении необходимой точности, которую проще всего контролировать как скользящую среднюю величину абсолютного значения разности оценок цены игры для И1 и для И2: $\Delta v(t) = |\max_i v_i(t) - \min_j v_j(t)|$. Можно также использовать для остановки итерационного процесса скользящую дисперсию или скользящее среднеквадратическое отклонение величины $\Delta v(t)$.

Многочисленные имитационные эксперименты показали, что процесс сходимости за приемлемое количество итераций сильно зависит от значений элементов платежной матрицы игры и в частности от разности верхней и нижней цены игры. Приведем иллюстрацию сходимости оценок для игры 3×3 .

Пример. Платежная матрица имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 6 & 1 & 4 \\ 2 & 4 & 2 \\ 4 & 3 & 5 \end{bmatrix}.$$

Эта игра не имеет седловой точки, значит следует искать ее решение в смешанных стратегиях. Если воспользоваться для этого традиционным методом сведения игры к ЗЛП, то найденное таким образом точное решение будет следующим: $\bar{p} = [0 \quad 0.33 \quad 0.67]^T$, $\bar{q} = [0.33 \quad 0.67 \quad 0]^T$, $V = 3.33$.

Графики сходимости оценок элементов решения, полученных методом Брауна-Робинсон, для 100 шагов приведены на рисунке 1.

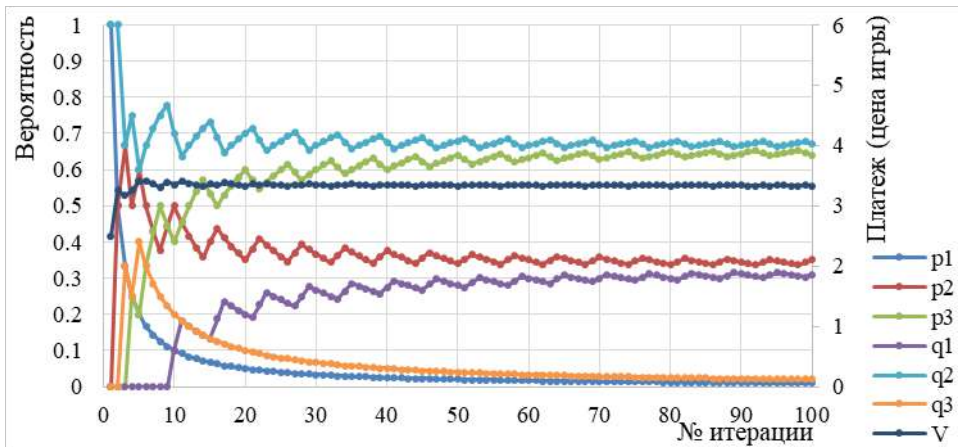


Рисунок 1 – Сходимость оценок решения матричной игры

Финальные за 100 итераций значения оценок решения следующие: $\hat{p} = [0.01 \quad 0.35 \quad 0.64]^T$, $\hat{q} = [0.31 \quad 0.67 \quad 0.02]^T$, $\hat{V} = 3.34$. Так погрешность по цене игры составляет 0.3% от точного значения.

Для модельных примеров (когда известно точное решение) в качестве меры точности текущих оценок элементов решения можно рассматривать нор-

мированную длину вектора разности векторов оценки и фактического вектора оптимальной смешанной стратегии игрока. Так, нормированная (лежащая в интервале от 0 до 1) длина вектора $\hat{\rho}_k = \bar{p} - \hat{p}_k$, как расстояние от вектора оценок до вектора фактической оптимальной смешанной стратегии, приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Сходимость показателей точности решения

На том же рисунке приведена и другая мера, вычисляемая на каждой итерации. Это пошаговое изменение длины вектора оценок оптимальной стратегии И1: $\hat{\delta}_{k+1} = \hat{p}_k - \hat{p}_{k+1}$. Для данного примера оценки таковы, что через 100 итераций величина $\hat{\rho}_{100} = 0.023$, т.е. 2.3% максимально возможного отклонения вектора оценок от фактического. Но эта мера доступна только в условиях имитационных исследований. Другая мера сходимости ($\hat{\delta}_{k+1}$) не требует знания фактического вектора оптимальной смешанной стратегии, а значит доступна и в условиях реального применения алгоритма. Ее значение для данного примера $\hat{\delta}_{100} = 0.007$, т.е. 0.7% от максимально возможного значения. Коэффициент корреляции между этими двумя мерами в данном примере составил 0.87, что говорит о высокой статистической связи этих двух мер сходимости оценок, а значит при практическом использовании алгоритма Брауна-Робинсон, для остановки итерационного алгоритма, с большой степенью уверенности можно использовать показатель $\hat{\delta}$.

Компьютерная реализация и тестирование

Предложенный в работе метод игровых итераций для решения ЗЛП был реализован в виде отдельной программы «Скат» на языке Object Pascal в среде Delphi. Одно из окон интерфейса программы (результат решения ЗЛП) представлен на рисунке 3.

Огр./Пер.	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	Усл.	Прав.ч	ВЮрт
max	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	=	1.290	
1	0.033	0.007	0.033	0.002	0.033	0.011	0.001	0.054	0.017	0.053	0.022	0.011	<=	1.000	0.708
2	0.017	0.016	0.003	0.073	0.021	0.043	0.006	0.006	0.017	0.034	0.020	0.003	<=	1.000	1.000
3	0.031	0.008	0.021	0.041	0.018	0.070	0.025	0.021	0.001	0.005	0.022	0.011	<=	1.000	1.000
4	0.016	0.018	0.001	0.036	0.024	0.017	0.030	0.052	0.025	0.055	0.000	0.011	<=	1.000	0.992
5	0.059	0.031	0.026	0.017	0.009	0.054	0.020	0.016	0.025	0.017	0.005	0.005	<=	1.000	0.753
6	0.014	0.035	0.012	0.005	0.024	0.032	0.037	0.035	0.015	0.002	0.013	0.061	<=	1.000	1.000
7	0.022	0.070	0.006	0.006	0.015	0.001	0.035	0.007	0.021	0.029	0.023	0.034	<=	1.000	0.999
8	0.024	0.018	0.036	0.004	0.017	0.033	0.015	0.012	0.042	0.043	0.049	0.007	<=	1.000	1.000
9	0.015	0.008	0.008	0.020	0.014	0.018	0.031	0.080	0.012	0.018	0.024	0.018	<=	1.000	1.000
10	0.004	0.026	0.009	0.021	0.030	0.046	0.017	0.004	0.031	0.050	0.027	0.037	<=	1.000	0.964
11	0.024	0.015	0.054	0.015	0.016	0.033	0.023	0.045	0.002	0.037	0.023	0.017	<=	1.000	1.000
12	0.026	0.019	0.003	0.029	0.022	0.042	0.029	0.021	0.022	0.013	0.009	0.062	<=	1.000	0.973
13	0.057	0.005	0.005	0.010	0.039	0.018	0.027	0.007	0.025	0.047	0.034	0.004	<=	1.000	0.961
14	0.047	0.018	0.019	0.030	0.019	0.025	0.029	0.005	0.044	0.041	0.003	0.027	<=	1.000	1.000
15	0.032	0.007	0.014	0.015	0.067	0.028	0.002	0.011	0.040	0.014	0.032	0.014	<=	1.000	1.000
XOpt	0.000	2.635	4.457	7.532	5.926	0.000	10.796	1.947	3.563	0.000	6.495	1.129	0		

Модель : Лин.прогр. Источник генератор : 0:00:00

Рисунок 3 – Окно решения ЗЛП методом игровых итераций в программе «Скат»

«Скат» позволяет решать ЗЛП достаточно больших размерностей (до нескольких сотен переменных и ограничений) с необходимой точностью за приемлемое время (от долей до единиц секунд на современных компьютерах). На рисунке 3 приведены результаты решения ЗЛП с 12 переменными и 15 ограничениями. Программа обладает широкими возможностями по загрузке данные из разных источников и выполнению необходимых настроек интерфейса. В случае двух переменных в ЗЛП «Скат» позволяет отображать результаты графически (см. рис. 4).

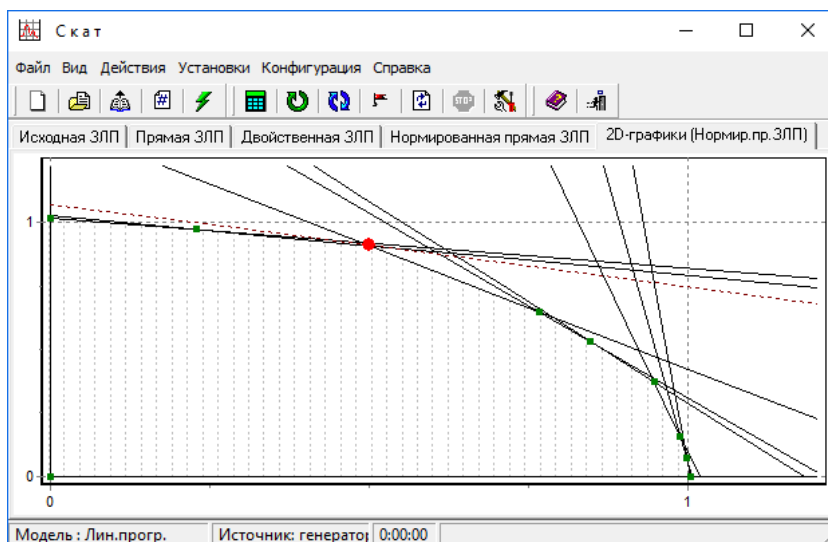


Рисунок 3 – Окно графического представления решения ЗЛП

Пример. Продемонстрируем приведенную схему решения ЗЛП методом игровых итераций с применением программы «Скат» на простом примере распределения ограниченного ресурса [2].

Пусть есть задача максимизации некоторого эффекта $L(\bar{y})$, зависящего от вектора переменных $\bar{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$. По структуре эта задачи соответствует постановке (7)-(8), т.е. ее оптимальное решение, в соответствии с методом игровых итераций, определяется оптимальной стратегией второго игрока. Таким образом, следуя принятым обозначениям, данная ЗЛП является двойственной. Ее целевая функция, критерий и ограничения имеют вид:

$$L(\bar{y}) = 3y_1 + 2y_2 + 5y_3 \rightarrow \max_{\bar{y}}, \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 + 2y_2 + y_3 &\leq 430 \\ 3y_1 + 0y_2 + 2y_3 &\leq 460 \\ y_1 + 4y_2 + 0y_3 &\leq 420 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$y_j \geq 0, \quad j = \overline{1,3}. \quad (17)$$

Эквивалентная ЗЛП (15)-(17) антагонистическая матричная игра, с учетом преобразования (12), представляется следующей матрицей платежей:

$$A = \begin{bmatrix} 77.519 & 232.558 & 46.512 \\ 217.391 & 0 & 86.957 \\ 79.365 & 476.190 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-5}. \quad (23)$$

Решив эту игру методом Брауна-Робинсон с помощью программы «Скат», получим:

$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= [0.218520 \ 0.681180 \ 0]^T \\ \bar{q} &= [0 \ 0.148149 \ 0.851851]^T \\ V &= 74.074 \times 10^{-5} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Оптимальному решению исходной двойственной ЗЛП соответствуют оптимальные смешанные стратегии второго игрока (\bar{q}), а прямой ЗЛП – стратегия \bar{p} первого игрока.

Тогда из (14) и (24) решение двойственной задачи будет следующим:

$$y_1 = 0; \ y_2 = 100; \ y_3 = 230; \ L = 1350, \quad (25)$$

решение прямой ЗЛП:

$$x_1 = 1; \ x_2 = 2; \ x_3 = 0; \ W = 1350. \quad (26)$$

Для проверки адекватности решения, полученного методом игровых итераций, оптимальное решение задачи (15)-(17) было найдено симплекс-методом с использованием надстройки «Поиск решений» MS Excel. Найденное решение прямой и двойственной ЗЛП полностью совпало со значениями (25), (26).

Обсуждение результатов

1. Важной характеристикой *метода игровых итераций* является скорость получения оптимального решения. Как свидетельствуют литературные источники [5, 12], симплекс-метод позволяет искать решение со скоростью экспоненциально зависящей от размерности пространства переменных (например, как $c \times 2^n$, где c – константа, n – размерность пространства переменных), метод Кармаркара дает полиномиальную зависимость скорости поиска решения от размерности пространства (например, $c \times n \times m$).

Имитационный эксперимент для исследования зависимости скорости сходимости оценок решения ЗЛП от параметров задачи проведен с использова-

нием программы «Скат» на современном компьютере с параметрами: Intel Core i7-4702MQ CPU 2*2.4 GHz, RAM 16 Gb. Анализ, проведенный при фиксированном количестве итераций (10^6), показал, что скорость расчетов (время t) не зависит отдельно от количества переменных ЗЛП (n) и количества ограничений (m), а зависит от их суммы ($m + n$). Эта регрессионная зависимость имеет вид: $t = 0.044(m + n)$; [сек]. Например, для $m + n = 100 + 100 = 200$ время расчетов составляет около 8.8 сек. Следует заметить, что даже для задач большой размерности количество итераций 10^6 обеспечивает очень высокую точность расчетов, обычно достаточную для большинства прикладных задач оптимального управления. Так в приведенном выше примере даже за 10^2 итераций точность составляет доли или единицы процентов.

Если важным является время реакции системы, то желательно знать зависимость времени расчетов от количества итераций. В вычислительном эксперименте был проварьирован и этот параметр, причем в качестве фактора рассматривалась степень (e) основания 10. Варьировался и фактор размерности ($m + n$). Квадратичная (по фактору e) двухфакторная регрессионная модель имеет вид: $t = 0.037(m + n) - 3.82e + 0.56e^2$; [сек]. Коэффициент детерминации этой модели составляет $R^2 = 0.93$. Она достаточно хорошо описывает зависимость продолжительности вычислений от количества итераций в диапазоне $10^5 - 10^7$. При значениях меньше 10^5 даже для больших размерностей вычисления производятся за десятые или сотые доли секунд. Конечно, для реализации алгоритма игровых итераций на тех или иных бортовых компьютерах или микропроцессорах необходимы дополнительные исследования зависимости времени вычислений от параметров вычислительной среды и решаемых задач.

2. Достоинствами *метода игровых итераций* можно считать его простоту и прозрачность, относительно высокую скорость получения решения. Скоростью поиска решения можно управлять за счет выбора приемлемого уровня точности расчетов. Эти свойства открывают новые возможности использования линейной оптимизации во встраиваемых системах управления, широко распространяемых в настоящее время, например, в таких как робототехнические системы, умный дом, интернет вещей и др.

3. Недостатками *метода игровых итераций* является некоторое ограничение круга решаемых им задач, обусловленное тем, что они должны иметь неотрицательные значения правых частей ограничений и коэффициентов целевой функции. В отдельных случаях это ограничение можно ослабить путем линейного преобразования пространства переменных. Однако следует заметить, что значительное количество задач оптимального распределения ограниченных ресурсов относятся именно к тому типу, который рассмотрен в данной работе.

Выводы

1. Предложенный в работе метод игровых итераций, предназначенный для численного решения такой очень широко используемой на практике оптимизационной модели как задача линейного программирования, показал свою работоспособность на задачах достаточно большой размерности.

2. В работе на многочисленных модельных примерах показано, что скорость численного поиска решения с использованием метода игровых итераций линейно зависит от суммы размерности пространства переменных и количества

ограничений, что является важным достоинством предложенного метода по сравнению с другими, используемыми для решения задач линейного программирования.

3. Программная реализация «Скат» метода игровых итераций, представленная в работе, позволяет решать задачи линейного программирования для различных приложений, а ее библиотечная (.dll) версия дает возможность импортировать функции метода игровых итераций из других приложений.

4. Высокая скорость решения оптимизационных задач линейного программирования с помощью метода игровых итераций позволяет использовать этот простой в реализации и устойчивый в работе алгоритм в составе бортовых алгоритмов оптимального управления современных встраиваемых систем управления в самых различных прикладных областях.

Литература

1. Браун Р.Х. Решение одной антагонистической игры // Бесконечные антагонистические игры / Под ред. Н. Н. Воробьева // М.: Физматгиз, 1963. С. 419-425.
2. Вилисов В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР // Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing . 2011. 376 с.
3. Вилисов В.Я. Об алгоритмах адаптации робота к целевым предпочтениям ЛПР / Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис, 2012. С. 124-130.
4. Данилин В.И. Финансовое и операционное планирование в корпорации. Методы и модели: учебник // М.: Изд. дом «Дело» РАНХиГС, 2014. 616 с.
5. Данциг Дж. Б. Линейное программирование, его применения и обобщения // М.: Прогресс, 1966. 601 с.
6. Емец О.А., Ольховский Д.Н., Ольховская Е.В. Сравнение методов решения игровых задач: числовые эксперименты // Искусственный интеллект . 2014. № 1. С. 47-56. [Электронный ресурс]. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/85236/7-Iemets.pdf?sequence=1> (дата обращения: 20.03.2019).
7. Кобзарь А.И., Тикменова И.В., Тикменов В.Н. Сравнительный анализ решения матричной игры $m \times n$ методом линейного программирования и итерационным методом Брауна-Робинсон // Электронные информационные системы, 2014. №3(3). С. 33-52. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23618071> (дата обращения: 20.03.2019).
8. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений // М.: Наука, 1977. 76 с.
9. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение // М.: Наука, 1970. 707 с.
10. Оуэн Г. Теория игр // М.: Мир, 1971. 230 с.
11. Робинсон Дж. Итеративный метод решения игр // Матричные игры / Под ред. Н. Н. Воробьева // М.: Физматгиз, 1961. С. 110-18.
12. Таха Х.А. Введение в исследование операций // М.: Изд. дом Вильямс, 2005. 912 с.

УДК 621.9.06

Преимущества и перспективы развития 3D-проектирования и аддитивных технологий

П.В. Емельянов, инженер отдела системы менеджмента качества
и стандартизации,

О.А. Воейко, кандидат технических наук, доцент кафедры
Управления качеством и стандартизации,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

3D проектирование и аддитивные технологии – наиболее динамично развивающиеся направления современного цифрового производства. Их внедрение позволяет существенно сократить сроки и повысить качество выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также уменьшить издержки при серийном производстве.

Аддитивные технологии, 3D печать, 3D моделирование.

Advantages and prospects for the development of 3D-design and additive technologies

P.V. Emelyanov, engineer of quality management system and standardization,

O.A. Voeyko, PhD, Associate professor of the,
Department of Quality management and standardization,
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

3D design and additive technologies are the most dynamically developing ways of modern digital production. Their implementation can significantly reduce the time and improve the quality of research and development work, and at the same time reduce the costs of mass production.

Additive technology, 3D printing, 3D modeling.

Преимущества технологий 3D моделирования относительно традиционных методов проектирования довольно весомы. Основное преимущество такого метода проектирования состоит в минимизации числа ошибок, обусловленных влиянием человеческого фактора. Если, к примеру, резьба в отверстии корпусной детали не совпадет по номиналу или шагу с резьбой крепежа – система выдаст ошибку, с оповещением, что так делать нельзя. Она подскажет, что надо проверить, чтобы ничего не упустить. Кроме того, благодаря дополнительному функционалу можно рассчитать центр массы, определить вес изделия и другие параметры – все просчитывается автоматически.

Раньше такие операции выполнялись вручную, что, в случае допущения

ошибки на этапе проектирования, приводило к большим проблемам.

Сейчас ошибки такого рода исключены полностью. Вся нужная разработчику спецификация стандартных компонентов подбирается автоматически (рис. 1). Процесс начинается с создания 3D модели изделия, а ее чертежи для выпуска бумажных копии и передачи на производство «нарезаются» прямо на экране монитора [1].

Другое важное преимущество использования 3D-проектирования – сокращение трудоемкости работы конструктора. Если раньше на разработку оснастки средней сложности уходило 3-4 дня, то сейчас – от 8 до 16 часов.

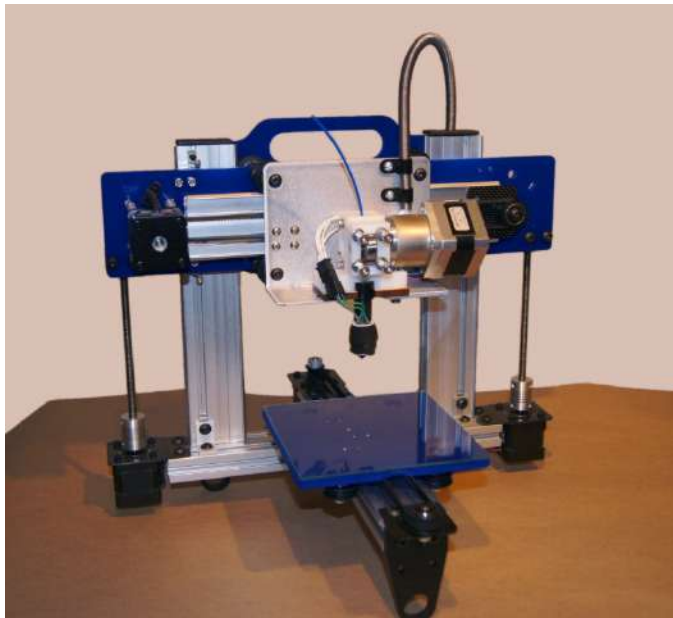


Рисунок 1 – 3D принтер

В данный момент в России используют несколько систем для 3D-проектирования: отечественная система «Компас 3D» (рис. 2) и система разработки США «SolidWorks 3D» (рис. 3).

«Компас 3D» – это универсальная программа трехмерного моделирования и проектирования, являющаяся основой многих предприятий, благодаря интуитивной простоте и значительному функционалу. Благодаря встроенным элементам трехмерного просмотра проекта чертежа, система «Компас 3D» идеально подходит для 3D печати.

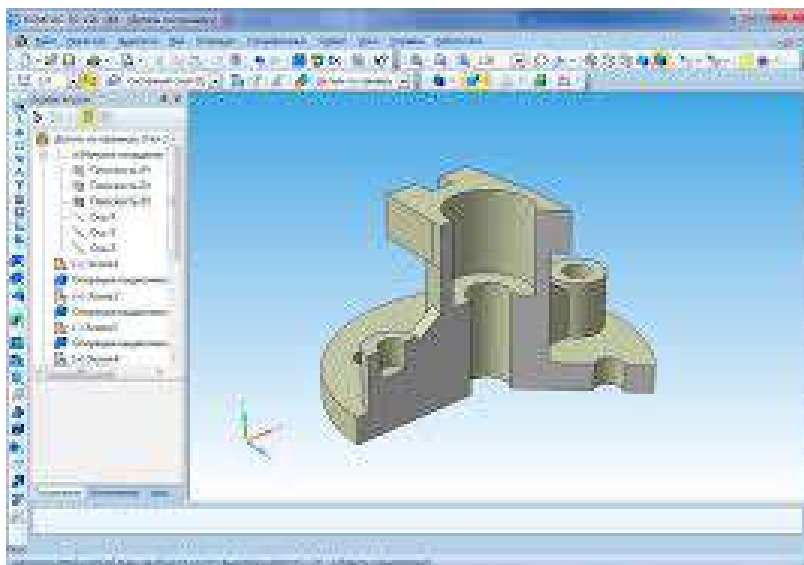


Рисунок 2 – Интерфейс программы «Компас 3D»

«SolidWorks 3D» – это комплекс программного обеспечения, используется для конструкторской и технологической подготовки производства, позволяет разрабатывать как сложные, так и простые изделия. По сравнению с Компасом имеет несколько сложный интерфейс и не так прост в освоении.

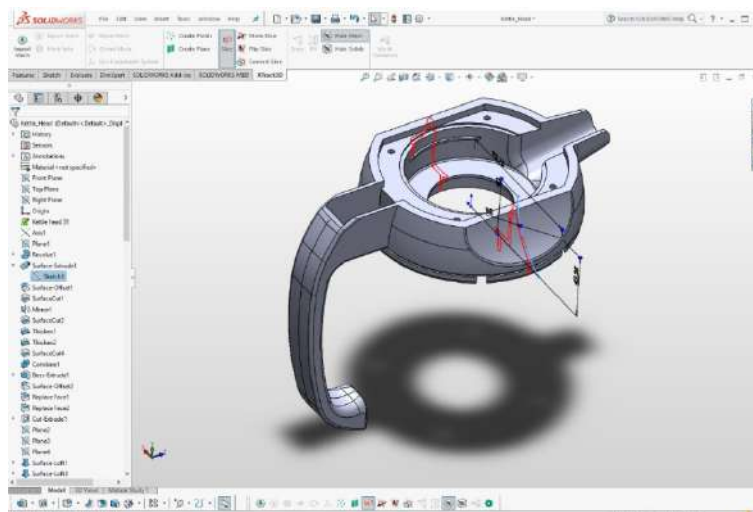


Рисунок 3 – Интерфейс программы «SolidWorks 3D»

Для эффективного ведения работ 3D-моделирования достаточно использовать самый простой и дешевый 3D принтер, работающий по технологии FDM-печати. С его помощью можно изготавливать модели изделия, проводить макетирование и оценивать простоту будущей сборки – это нужно для наглядности. Возможность видеть изделие не только на экране, но и покрутить его в руках,

очень помогает в работе. В космических аппаратах каждый сэкономленный грамм превращается в огромные деньги. Очень жесткие технические задания заставляют высчитывать каждый миллиметр, чтобы выиграть в массе и размере готового изделия [2].

Но технология 3D-печати применяется не только для наглядности. Детали, распечатанные даже при помощи самых простых 3D-принтеров, могут использоваться для изготовления простых деталей из пластика. Они применяются там, где не нужна высокая температурная стойкость материала. К примеру – для изготовления оснастки (рис. 4).



Рисунок 4 – Оснастка, изготовленная на 3D принтере

3D-печать так же может использоваться для изготовления металлических изделий. Технология заключается в напылении тончайшими слоями специального порошка, который с помощью лазерных головок спекается, формируя нужное изделие. Но там, где требуется очень высокая точность или качество наружной поверхности, нужна дополнительная обработка, так как получить высокий класс шероховатости поверхностей деталей после 3D-прототипирования пока не представляется возможным. Лучшее современное оборудование не позволяет обеспечить шероховатость наружной поверхности ниже 50 мкм. Металл в отличие от пластика нельзя обрабатывать с помощью химических процессов [3], которые позволяют существенно улучшить шероховатость поверхности детали. Таким образом, технология изготовления металлических деталей на 3D-принтерах сложна там, где есть очень сложная по профилю конструкция, которая при этом не требует дополнительной обработки. Однако для таких целей при мелкосерийном производстве закупка дорогостоящего оборудования малорентабельна – преимущества от его применения не окупят высокую цену. Для сравнения простой принтер, работающий по технологии FDM печати, стоит в пределах 100-450 тыс. руб., стоимость промышленного принтера для печати изделий из пластика оценивается в 20-40 млн. руб., а принтер, работающий с металлом, стоит порядка 150 млн. руб. и выше.

Расчеты подтверждают, что существенную экономию средств может обеспечить применение не только офисных, но и промышленных 3D принтеров. Изготовление 10 пресс-форм для деталей полностью покрывают стоимость такого принтера. А номенклатура пресованных деталей, большинства предприятий превышает 100 единиц. Препятствиями на пути широкого распространения аддитивных технологий являются следующие:

- выбор материалов для аддитивного производства весьма ограничен;
- высокая стоимость материалов обслуживания (требуются специальные форматы материалов, которые могут быть дороже традиционных в 100-200 раз);
- отличия в геометрии и свойствах между «идентичными» деталями, изготовленными на разных установках 3D-прототипирования;
- закрытая архитектура большинства установок для аддитивного производства, что не позволяет исследователям и технологам варьировать условия обработки.

Для производства полимерных макетов используется пластик ABS [4]. ABS – это беспрозрачный термопластичный материал, обладающий высоким коэффициентом ударопрочности. Используется как для производства прототипов, так и для сертифицированных образцов изделий. Эффективен для производства из-за низкой температуры застывания, но при этом имеет довольно высокий порог нагрева, что позволяет использовать оснастку, изготовленную из ABS, в работах с экстремальными условиями эксплуатации. Главным минусом является термоусадка – из-за которой размеры оснастки могут меняться от воздействия высоких температур.

В данный момент тенденция производства направлена на переход на другой вид пластиков – PLA [4]. PLA – это органический пластик, имеющий высокие технические характеристики и обладающий свойствами сохранения своей формы в процессе эксплуатации. Основным недостатком можно считать относительно короткий срок эксплуатации.

Также существует третий вид пластика – PVA [4]. PVA – водорастворимый пластик, который используется для поддержания нависающих элементов изделия. Используется вторым экструдером. Данный вид пластика неэффективен для использования в промышленности по прямому назначению, но без него невозможно создать большую часть изделий.

Стоимость российского материала – катушка весом 1 кг, на которую накручена нить диаметром 1,75 мм из полимерного материала – ABS, составляет примерно 1,5 тыс. руб. При этом из нее можно изготовить 10-20 небольших деталей. При традиционной обработке материал будет стоить немногим дороже, но трудозатраты и стоимость инструмента окажутся несопоставимыми.

Одним из ограничений FDM-принтеров является то, что они работают с низкотемпературными пластиками. Однако в настоящее время ведутся экспериментальные работы с организациями изготовителями 3D принтеров с целью обработки технологии Polyjet, которая позволяет использовать термостойкие пластики, выдерживающие температуру до 300 градусов Цельсия и выше.

Тем не менее, будущее именно за аддитивными технологиями. Уже сейчас лучшие промышленные 3D принтеры позволяют работать не только с пластиками и металлами, но и вести изготовление керамических деталей, изделий из

нескольких различных по структуре физико-механическим свойствам материалов. В будущем можно будет печатать СВЧ-платы с элементами на принтере.

Учитывая, что методика 3D печати постоянно улучшается, и разрабатываются новые модели печатных элементов, это позволяет развивать новые преимущества, относительно прошлых моделей принтеров:

- воссоздание точной копии до мельчайших элементов заданного объекта;
- низкий расход материала;
- возможность производства одинаковой продукции;
- длительное и удобное хранение производственных материалов;
- улучшение экструдеров для более быстрого наслоения изделия.

Технология печати, по сути, является алгоритмом последовательных действий, ведущих к формированию готового изделия. Этапы печати представлены на рис. 5.

Процесс 3D печати	<ul style="list-style-type: none"> - подключение принтера непосредственно к компьютеру, при помощи специальной программы создание заданной 3D модели в нескольких видах;
	<ul style="list-style-type: none"> - модель сохраняется в определенном формате и загружается в программу слайсер (нарезка модели на слой), где формируются настройки печати и ее положение относительно платформы;
	<ul style="list-style-type: none"> - модель конвертируется в компьютерный код, поступающий в принтер, где приобретает габаритные размеры и обозначение слоев изделия;
	<ul style="list-style-type: none"> - после этого начинается сам процесс печати.

Рисунок 5 – Процесс печати на 3D принтере

Печать проходит по принципу наслоения материала. Так как программное обеспечение задает все габаритные размеры, форму и слои, то при подготовке к печати, экструдеру (соплу с материалом) задается скорость подачи полимерной смеси и другие параметры. Пруток материала подается в печатающую головку, где плавится и выходит из сопла. Закончив нижний слой, принтер либо поднимает головку экструдера, либо опускает платформу с изготавливаемым предметом и начинает наносить новый слой поверх уже имеющегося.

Из этого исходит понятие термина аддитивное производство. При использовании станка с ЧПУ с заготовки удаляются лишние слои материала. При 3D печати все наоборот: объект выстраивается с нуля, слой за слоем. Это и есть понятие термина аддитивный процесс (add – добавлять).

Альтернативным методом производства оснастки является фрезерование оснастки на станке с ЧПУ. Этапы фрезерования на станке с ЧПУ представлены на рисунке 6. Точность находится не на максимально возможном уровне, поэтому

требует добавления дополнительного этапа производственного цикла (третий пункт). Использование пластика для 3D принтера намного дешевле, поскольку одна заготовка из пластика стоит около 2 000 руб., а картридж с пластиком, который идет на изготовление 20 изделий, стоит всего 1 500 руб. Следовательно, производство пластмассовой габаритной заготовки на станке с ЧПУ требует дополнительных экономических вложений.

Фрезеровка на станке с ЧПУ	<ul style="list-style-type: none"> - разработка 3D проекта при использовании компьютерных программ (Компас 3D или SolidWorks 3D); - подготовка 3D модели и выбор рабочих инструментов для обработки, создание программы работы станка; - фрезеровка пробной модели из пластика, для определения конструктивных недостатков и внесения поправок; - фрезеровка чистового образца из металлической заготовки, с внесенными корректировками.
----------------------------	--

Рисунок 6 – Процесс фрезерование на станке с ЧПУ

Возможно ли объединить эти две технологии: процессы изготовления оснастки на станке с ЧПУ и 3D печать? Эти методы производства схожи по многим параметрам и в них применяются сходные программы.

Так как 3D модели изготавливаются в одной программной среде, то первый этап совмещения процессов напрашивается сам собой. Так как потребность к производству пробной пластмассовой модели, при фрезеровании на станке с ЧПУ обязательно, то стоит исходить из точности используемых методик производства. Фрезерный станок с ЧПУ и 3D принтер обладают примерно одинаковыми коэффициентами точности (0,02 и 0,025 соответственно). Учитывая фактор одинаковых точностей, можно перейти на показатель быстродействия и ресурсных затрат. Как указывалось выше, один картридж стоит дешевле, нежели одна пластиковая заготовка, а сам процесс печати несколько быстрее обработки фрезерными головками. Таким образом, при изготовлении оснастки методом печати, при меньших затратах, можно получить готовое дополнительное оборудование для внесения поправок и корректировок. Далее, если корректировок не требуется, можно применять данную оснастку, как для производства опытного образца изделия, так и для внедрения до истечения эксплуатационных возможностей. Также можно использовать принцип принятия решения относительно используемой оснастки в зависимости от эксплуатационных возможностей.

Совмещение процессов фрезерования на станке с ЧПУ и печати на 3D принтере представлено на рисунке 7.

Совмещение процессов	<ul style="list-style-type: none"> - разработка 3D проекта при использовании компьютерных программ (Компас 3D или SolidWorks 3D); - сохранение модели в определенном формате и загрузка в программу слайсер (нарезка модели на слои); - конвертация в компьютерный код, поступающий в принтер, где приобретаются габаритные размеры и обозначение слоев изделия; - процесс печати на 3D принтере; - определение недостатков и внесение корректирующих действий (если нужны); - фрезеровка на станке с ЧПУ металлоизделия.
----------------------	---

Рисунок 7 – Совмещение процессов фрезеровки и печати

Дальнейшее решение по производству оснастки из пластика или металла принимается относительно производственной необходимости. Если оснастка требуется для производства крупной партии продукции или будет использоваться длительное время, то можно использовать фрезерование на станке с ЧПУ, так как оснастка получится лучше по коэффициенту долговечности. Если оснастка требуется для производства мелкосерийного или индивидуального производства изделий, являющихся конструкционно сложными, то эффективнее использовать оснастку, изготавливаемую на 3D принтере. Схема совмещения процессов фрезеровки и печати представлены на рисунке 8.

Итого, в качестве рекомендации, чтобы достичь наибольшей эффективности при производстве оснастки и повысить ее качество, можно совместить процессы 3D печати с изготовлением элементов на станке с ЧПУ. Аддитивная технология используется при производстве сложных элементов малого размера, что позволяет с первого раза и быстро производить продукцию высокого качества, а фрезеровка заготовок на станке с ЧПУ позволяет производить габаритные элементы, пусть и при длительном производственном цикле.

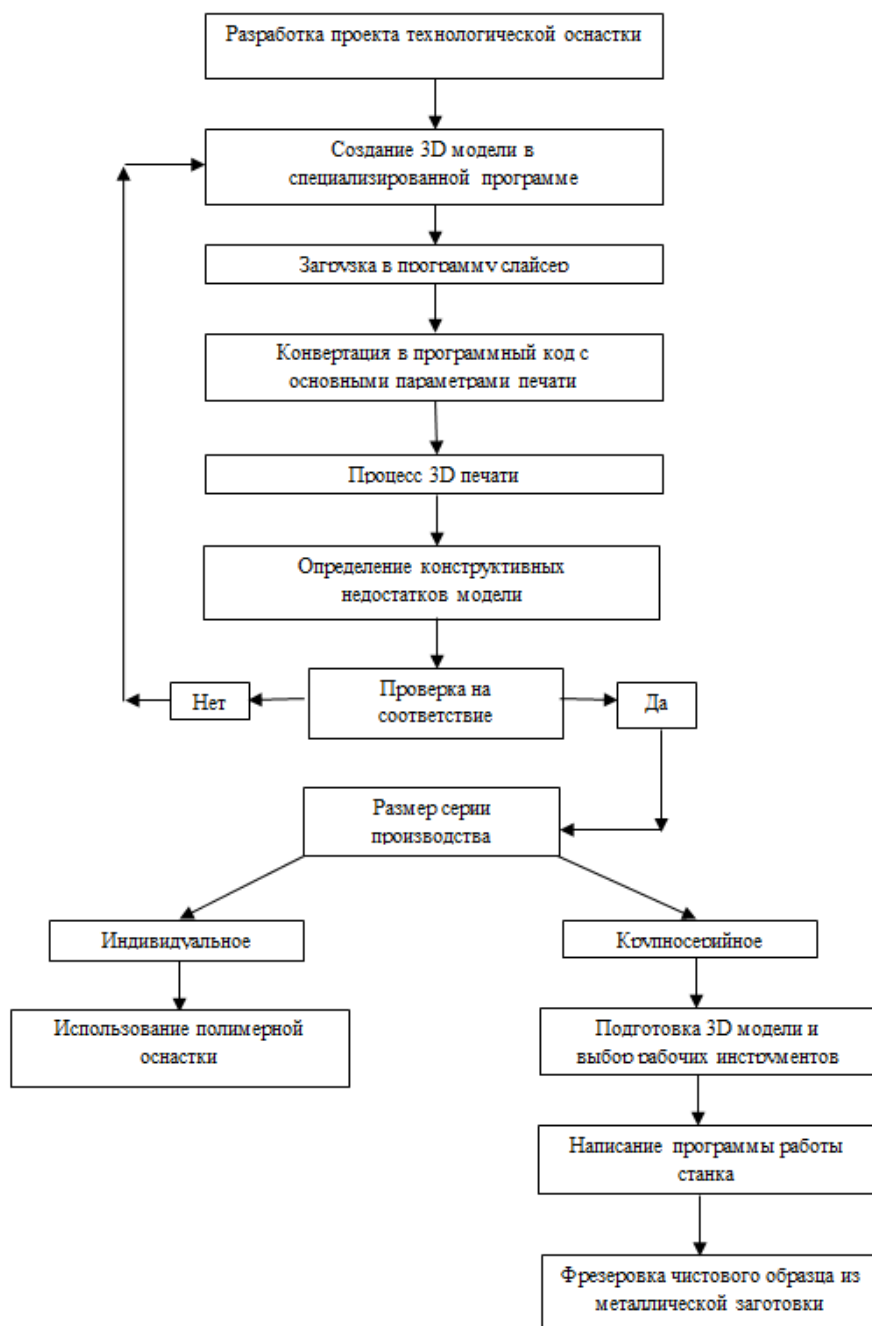


Рисунок 8 – Схема совмещения процессов фрезеровки и печати

При совмещении этих процессов, можно улучшить процесс производства и уменьшить его затраты. Получаем, что при совмещении двух методов, процесс изготовления может и будет относительно долговременным, но качество оснастки и ее точность будут на максимально возможном уровне. Таким образом, ис-

ключается надобность закупок на сторонних предприятиях, что в целом положительно сказывается на экономической составляющей. Так же производство оснастки внутри цехов позволяет модернизировать станочный парк, увеличивая общую номенклатуру изделий.

Литература

1. Старцева Т.Е., Антипова Т.Н., Асташева Н.П., Воейко О.А. и др. Управление качеством в современной инновационной среде (монография) // М.: Научный консультант, 2018. 338 с.
2. Строганов Р. (Little TinyH). 3D печать. Коротко и максимально ясно [Электронный ресурс]. URL: <https://mplast.by/biblioteka/3d-pechat-korotko-i-maksimalno-yasno-littletinyh-books-2016-god/> (дата обращения: 24.04.2019).
3. Богданов Г.П., Исаев В.Г., Воейко О.А., Клейменов Ю.А. Метрология: учебное пособие // Королев М.О.: МГОТУ: Канцлер, 2018. 222 с.
4. Виды пластиков для 3D печати [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/cvetmir3d/plastics> (дата обращения: 24.04.2019).

УДК 004.056

Особенности архитектуры комплексов оценки информационной безопасности

Н.А. Кравченко, аспирант третьего года обучения кафедры управления
качеством и стандартизации,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область,
ИТ-директор АО «Лаборатория SKAT», г. Москва

В статье анализируются задачи по борьбе с угрозами в информационном пространстве и место средств оценки безопасности в их контексте. Анализируются особенности архитектуры комплексов оценки различных средств защиты информации (СЗИ). Для примера оценки системы управления информационной безопасностью (ИБ) – Security information and event management (SIEM) построена диаграмма Исикавы. На основе ее анализа сделаны выводы о факторах, влияющих на выполнение плана испытаний.

Информационная безопасность, качество программного обеспечения, средства оценки безопасности.

Features of architecture of security assessment complexes

N.A. Kravchenko, graduate third year of the Department of Quality
Management and Standardization,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,
CIO JSC «Laboratory SKAT», Moscow

The article analyzes the tasks of combating threats in the information field and the place of security assessment tools in their context. The features of the architecture of the assessment complexes of various information security tools are analyzed. For an example of assessing the Security information and event management (SIEM), Ishikawa diagram was constructed. On the basis of its analysis, conclusions were drawn about the factors influencing the implementation of the test plan.

Information security, software quality, safety assessment tools.

Разработка информационных систем (ИС), соответствующих высоким требованиям по безопасности, является сегодня настолько актуальной задачей, что информационные угрозы и направления по борьбе с ними становятся предметом обсуждения на самом высоком государственном уровне.

Президент России Владимир Путин на расширенном заседании Совета Безопасности указал [1] на повышение уровня угроз в информационном пространстве, увеличение числа рисков и изменение характера и масштаба послед-

ствия кибератак с локального на глобальный. В качестве примера он привел вирус «Вонна Край», который нанес ущерб информационным ресурсам в 150 странах мира, включая Россию. Особое внимание он обратил на возможные цели атак: оборону, госуправление, инфраструктуру и финансы.

Президент России наметил меры реагирования на угрозы в информационном пространстве [1].

Первая мера предполагает совершенствование государственной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак на информационные ресурсы России.

Вторая мера предусматривает необходимость повышения защищённости ИС и сетей связи государственных органов, а также усиления персональной ответственности руководителей за обеспечение ИБ.

Третья мера требует максимального снижения рисков использования иностранных программ и телекоммуникационного оборудования за счет последовательного импортозамещения.

Четвертая мера касается инфраструктуры российского сегмента интернета и предполагает повышение его безопасности и устойчивости.

Пятая мера рассчитывает на создание системы международной информационной безопасности.

В этих условиях весьма актуальной является разработка комплекса оценки ИБ. Такой комплекс может быть использован в практике сертификации СЗИ и аудита различных ИС.

Сертификации СЗИ повышенное внимание уделяется также в контексте борьбы с кибертерроризмом и связанной с этим задачи импортозамещения.

Выступая на пленарном заседании Международного конгресса по кибербезопасности, Президент России заявил [2] о стремлении основывать программное обеспечение и инфраструктуру связи, действующие в России, на отечественных технологиях и прошедших проверку и сертификацию решениях.

Но задача оценки показателей безопасности ИС имеет еще одну сторону – педагогическую. Проблематика оценки безопасности рассматривается с разных сторон в программах подготовки магистров и бакалавров соответствующих специальностей. Способы оценки безопасности ИС, основанные на анализе реального опыта сертификации, аттестации и аудита, могут быть использованы при составлении учебных планов и проведении практических работ.

Заявляя о реализации в России программы конкретных мер по борьбе с киберпреступлениями, Владимир Путин в качестве одного из шагов сказал о планах [2] качественного повышения уровня подготовки российских специалистов по противодействию киберпреступности. Для этого он предложил активнее внедрять практико-ориентированные подходы, использовать передовой зарубежный и российский опыт.

Проанализированные ранее тенденции развития IT-технологий и СЗИ позволили сформировать облик перспективного средства оценки безопасности, который должен включать [3]:

- средство моделирования;
- модуль интеграции и импорта/экспорта на основе языка разметки;
- модуль поиска оптимальных решений на модели;

- инструмент внедрения разработанных методов в рамках одной из гибких методологий управления разработкой ПО.

Однако полномасштабные разработка и внедрение такого комплекса невозможны без предварительного анализа особенностей его архитектуры.

Как известно из стандарта «ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Системная инженерия – Процессы жизненного цикла систем», основными результатами успешного проектирования архитектуры являются [4]:

- порядок проектирование архитектуры;
- набор системных элементов, удовлетворяющих предъявляемым к системе требованиям;
- требования к интерфейсу.

Чтобы оценить сложность и многообразие архитектуры комплексов оценки, реально использованных в ходе проектов по сертификации различных СЗИ, рассмотрим в качестве примера оценку системы управления ИБ.

Для проведения сертификации был сформирован испытательный стенд (см. рисунок 1).

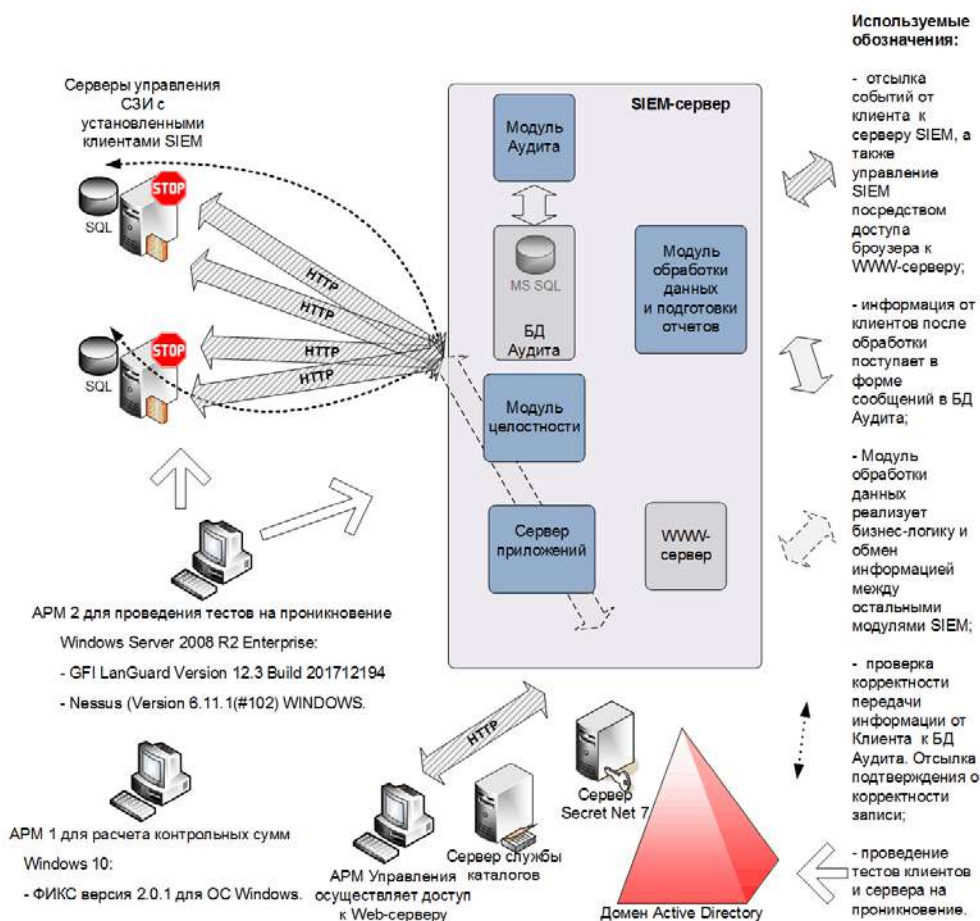


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда

Сложность настроек объекта испытаний и тестовых инструментов (снифферов, сканеров уязвимостей, средств управления требованиями и т.д.) можно оценить, перечислив требования по генерации отчетов и регистрации событий.

Отчеты SIEM должны соответствовать требованиям следующих стандартов:

- International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards (BASEL II);
- Ontario Securities Commission regulations (Bill 198);
- Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA);
- Best practice recommendations on information security management (ISO 27002);
- Protective monitoring of UK National Infrastructure Security systems (Memo 22);
- Federal Information Security Management Act (FISMA);
- North American Electric Reliability Council (NERC);
- Gramm-Leach-Bliley Act (GLBA);
- National Industrial Security Program Operating Manual (NISPOM);
- Payment Card Industry Data Security Standard (PCI);
- Sarbanes-Oxley Act (SOX);
- Statement on Auditing Standards No. 70 (SAS 70).

В журналах регистрации должны фиксироваться записи по следующим категориям событий:

- уязвимости (на этапах эксплуатации системы, атаки или разведки злоумышленником);
- доступ к контенту (нормальные и подозрительные запросы и транзакции);
- аутентификация;
- пользовательская активность;
- события, связанные с политиками доступа;
- системные события;
- конфигурирование.

Общее количество тестовых средств, использованных при испытаниях СЗИ средней сложности, может достигать нескольких десятков. Архитектура самих СЗИ также может быть сложной и распределенной.

Разработка плана проведения испытаний, обеспечивающего определение свойств ИС, должна проводиться как с учетом надежности оценки, так и с учетом ограничений – в первую очередь, по времени [3].

Очевидно, что план проведения испытаний должен учитывать факторы и условия, влияющие на надежность оценки и возможное нарушение временных ограничений.

Для этого воспользуемся одним из методов выявления факторов и условий, влияющих на качество оценки – диаграммой Исикавы [5]. Качественной оценкой будем считать оценку, удовлетворяющую обозначенным выше критериям по времени и надежности оценки [3]. Анализируемой проблемой будем счи-

тать невыполнение плана испытаний по любому из показателей.

Диаграмма Исикавы позволяет графически упорядочить факторы, влияющие на исход испытаний.

Прямая горизонтальная стрелка на диаграмме соответствует изучаемой проблеме, наклонные стрелки – факторам, влияющим на эту проблему (см. Рисунок 2).

Для обозначения на диаграмме главных факторов, повлиявших на результаты четырех испытаний трех SIEM-средств (одно средство испытывалось повторно после выхода новой версии), будем использовать правило «пяти М» (Materials, Machines, Methods, Management/Measuring, Men – материалы, машины, методы, управление/измерение, персонал).

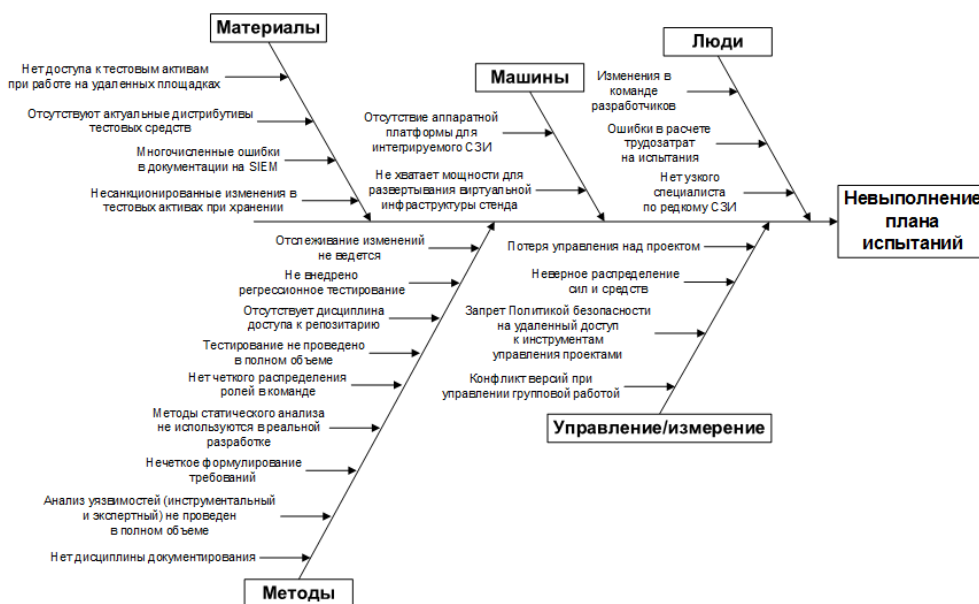


Рисунок 2 – Диаграмма Исикавы для анализа факторов, приведших к невыполнению плана испытаний

«Materials – материалы»: в качестве материалов в испытаниях СЗИ рассматривают, как правило, тестовые активы – разработанные ранее тестовые процедуры, иногда с заготовленными файлами трафика, сценариями тестирования графических интерфейсов, файлами конфигурации сетевых устройств, файлами настроек СЗИ и т.д. Большинство потенциальных проблем с тестовыми активами решается с учетом другого фактора – «Methods – методы», т.к. внедрение достаточно мощной технологии разработки решает возможные проблемы такого рода. Для рассматриваемых в этой диаграмме SIEM-средств следует отметить одну присущую именно им причину срыва сроков испытаний: низкое качество документации, описывающей настройку интеграции с другими СЗИ. Поскольку по количеству и сложности вариантов интеграции SIEM-средства являются несомненным лидером, документация на них изобилует лакунами и ошибками.

«Machines – машины»: самый незначительный фактор. В испытаниях

конкретных СЗИ – SIEM практически не оказал влияния на потенциальные проблемы. Но существуют СЗИ, которые, наоборот, требуют очень внимательного рассмотрения этого фактора – устройства в промышленном или особо надежном исполнении. Их испытания могут быть связаны с тремя факторами:

- невозможностью вывода объекта испытаний из промышленной эксплуатации для проведения тестов, а проведение тестов на работающей системе может быть строжайше запрещено по понятным причинам – особым требованиям к отказоустойчивости, проблемами с доступом на режимные объекты и т.д.;
- сложностью проведения конкретных тестов на конфигурациях СЗИ с дублированием. Например, испытаний межсетевых экранов в конфигурации Failover. Такие тесты требуют разработки специальных методик учитывающих, например, передачу между основным и дублирующим устройствами информации о соединениях на транспортном уровне в режиме реального времени;
- сложностью проведения тестов, учитывающих специфику СЗИ в части, например, протоколов управления промышленными устройствами DCON, Modbus и т.д. Такие испытания требуют или работы на реальных объектах (что может быть затруднено по рассмотренным выше причинам), или использования специальных эмуляторов, копий трафика, генерируемых снифферами и т.д.

Однако эти факторы относятся к достаточно специализированным промышленным и особо надежным СЗИ и требуют отдельного рассмотрения.

«Methods – методы»: очевидно, самый важный фактор! Проведенный анализ материалов четырех испытаний SIEM-средств показывает, что наибольшее количество проблем возникло именно по причинам неадекватных методик или из-за несоблюдения методик испытаний. Здесь следует рассматривать причины, связанные с нарушением требований к процессу разработки безопасных ИС, ошибки на отдельных этапах разработки (тестирование, управление требованиями, отслеживание изменений и т.д.) и большую часть ошибок взаимодействия членов команды.

«Management/Measuring – управление/измерение»: несомненно, важный фактор! Ошибки в управлении проектом, от неверного распределения сил и средств до элементарной потери управления над процессом испытаний, были достаточно частой причиной срыва сроков испытаний. Но этот фактор более предсказуем, чем «Methods – методы», т.к. внедрение в процесс разработки даже простейшего инструмента управления проектами позволяет свести риски к минимуму. Особо следует отметить техническую, но очень неприятную и частую проблему – конфликт версий документов при управлении групповой работой.

«Men – персонал»: достаточно важный, но, вместе с тем, прогнозируемый фактор. Требования к количеству привлекаемых к испытаниям специалистов и к уровню их квалификации определяются еще на этапе переговоров. Основные проблемы с персоналом решаются при помощи правильного управления, т.е., как и в случае с «Materials – материалы», возможные проблемы решаются за счет другого фактора – «Management/Measuring – управление/измерение». Имеются и специфические для этого фактора проблемы. Они связаны со сложностями на-

стройки интеграции с редкими СЗИ. Найти таких узких специалистов бывает иногда очень сложно. Еще одна частая проблема – существенные изменения в команде разработчиков за время оценки.

Выводы

Как следует из результатов анализа диаграммы Исикавы, некоторые факторы не требуют более детального анализа по той причине, что могут быть учтены в процессе анализа другого фактора:

- «Materials – материалы» – учитывается в процессе анализа фактора «Methods – методы»;
- «Men – персонал» – учитывается в процессе анализа фактора «Management/Measuring – управление/измерение».

Фактор «Machines – машины», как было отмечено, требует отдельного рассмотрения в контексте специализированных промышленных и особо надежных СЗИ.

Факторы «Methods – методы» и «Management/Measuring – управление/измерение», как наиболее существенные, должны быть учтены при проектировании комплексов оценки безопасности ИС. Составляющие этих факторов целесообразно проранжировать по значимости и выделить наиболее значимые вторичные, а может быть и третичные причины, приводящие к невыполнению плана испытаний и подлежащие устранению.

Литература

1. Заседание Совета Безопасности. Под председательством Владимира Путина в Кремле состоялось расширенное заседание Совета Безопасности. 26 октября 2017 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/55924> (дата обращения: 10.04.2019).
2. Владимир Путин выступил на пленарном заседании Международного конгресса по кибербезопасности, организованного ПАО «Сбербанк» при поддержке АНО «Цифровая экономика» и Ассоциации банков России. 6 июля 2018 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57957> (дата обращения: 10.04.2019).
3. Кравченко Н.А. Обоснование облика перспективного комплекса оценки информационной безопасности // Информационно-технологический вестник. № 01. 2019.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Системная инженерия – Процессы жизненного цикла систем.
5. Горбашко Е.А. Управление качеством: Учебное пособие // СПб.: Питер, 2008. 384 с., ил.

УДК 004.89, 004.94

Технология поддержки принятия решений в системе сетевидрического управления региональной безопасностью

А.В. Маслобоев, доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического моделирования
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты

Рассматриваются вопросы поддержки принятия решений по управлению развитием региональных социально-экономических систем. Разработана технология поддержки принятия решений в условиях сетевидрического управления безопасностью региона, отличающаяся структурой и методом реализации формальных процедур согласования и прогнозирования показателей региональной безопасности в блоке принятия решений системы регионального управления. Технология предназначена для информационно-аналитического обеспечения ситуационных центров региона.

Поддержка принятия решений, сетевидрическое управление, регион, безопасность, компьютерное моделирование, технология, мониторинг.

Decision-making support technology in regional security network-centric control system

A.V. Masloboev, Dr. Sci. Tech., Leading research fellow,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling
of the Federal Research Center
«Kola Science Center of Russian Academy of Sciences»
(IIMM KSC RAS), Apatity

The paper considers decision support problems in management of regional socio-economic system development. A decision-making support technology for regional security network-centric control, differing by the structure and implementation technique of coordination and prediction formal procedures of regional security indicators within the decision-making unit of the regional management system, has been developed. The technology is oriented to situational center information-analytical support in the region.

Managerial decision-making support, network-centric control, region, security, simulation, technology, monitoring.

Принятие обоснованных управленческих решений в условиях кризисных ситуаций в региональных социально-экономических системах, характеризую-

щихся высокой степенью неопределенности исходной информации о состоянии управляемой системы и последствиях реализации принятых решений в процессе управления, является актуальной научной задачей теории и практики организационного управления региональными и другими сложными системами. В процессе принятия решений необходимо не только обеспечивать согласование локальных решений на разных уровнях управления системой, но и прогнозировать эффект реализации выбранных альтернатив совместно с оценкой последствий этих решений для структурных элементов, подсистем и системы в целом. В некоторых случаях величина ущерба управляемой системе от неблагоприятных последствий неудачно принятых решений может существенно превысить получаемую от их реализации выгоду. Реальные эксперименты над социально-экономическими объектами не всегда возможны, так как могут сопровождаться непоправимыми негативными эффектами. В этих условиях повышается роль методологии и инструментов компьютерного моделирования, базирующихся на разработке и исследовании полимодельных комплексов, обеспечивающих вариативность проведения имитационных экспериментов на моделях управляемой системы и внешней среды в процессе выработки и реализации решений с целью сценарного анализа и прогнозирования динамики поведения системы и последствий принятых решений при различных условиях и вариантах развития ситуации.

В условиях повышения требований к системам обеспечения безопасности региона и постоянного роста объемов разноплановой информации о влиянии разнородных факторов на состояние элементов региональных систем, поступающей в органы государственного управления, и необходимости ее оперативной аналитической обработки одной из наиболее важных задач управления развитием социально-экономических систем является повышение эффективности и качества используемых средств поддержки принятия решений в системе регионального управления, позволяющих сопровождать процессы подготовки и реализации решений в рекомендательном режиме, а также проводить комплексную оценку и мониторинг проблемных ситуаций в регионе различного характера с учетом временных и ресурсных ограничений. В настоящее время такие средства широко внедряются в работу региональных ситуационных центров. Однако, в связи с недостаточными возможностями этих средств в части управления кризисными ситуациями в социально-экономической сфере регионального развития, для которых не возможно учесть все риски и последствия, возникает потребность в совершенствовании технологий интеллектуальной поддержки принятия решений в интересах органов государственной власти на региональном уровне. В работе рассматриваются общая структура и особенности реализации технологии интеллектуальной поддержки принятия решений в системе сетцентрического управления региональной безопасностью для информационно-аналитического обеспечения ситуационных центров региона.

Сетцентрическое управление региональной безопасностью

Информационная поддержка управленческой деятельности в сфере обеспечения региональной безопасности непосредственно связана с внедрением интеллектуальных систем поддержки принятия решений в ситуационные центры региона. Сеть большая, много управляющих центров и всем необходимо опера-

тивно предоставить информацию, точно соответствующую ситуации, которая сложилась в регионе, для принятия согласованных решений. Аспектов региональной безопасности много и они очень разнообразны. Их необходимо увязать в единое целое для оценки ситуационной осведомленности [1] в процессе принятия решений. Применение сетецентрического подхода [2] к решению этой сложной задачи представляется перспективным, поскольку при такой модели управления обеспечивается повышение оперативности поиска, получения, передачи и децентрализованной обработки требуемой информации для принятия решений по сравнению с жестким централизованным управлением, либо с ситуацией, когда средства поддержки принятия решений вовсе не применяются. Сетецентрическое управление безопасностью региона заключается в реализации сетевой структуры организационного управления с выделенными управляющими центрами, взаимодействие между которыми осуществляется на базе их интеграции в единое информационное пространство. Эффективность достигается за счет координации локальных решений сетецентрического управления на всех уровнях принятия решений. Для реализации такого подхода разработаны формальный аппарат и средства автоматизации синтеза систем сетецентрического управления региональной безопасностью [3].

Общая характеристика и структура технологии

Принятия решений является одним из китов, на которых держится управление. Упрощенно, управление рассматривается как последовательность обработки, принятия и реализации решений. От решения во многом зависит будущее объекта управления. Своевременные и «правильные» решения – залог безопасности и устойчивого развития социально-экономических систем, обеспечение чего в особенности важно для экономики и обороноспособности страны. Принятие решений не является одномоментным актом, а представляет собой сложный многоэтапный процесс. Согласно работе [4] технология принятия решений включает три основных этапа: сбор информации, поиск и нахождение альтернатив, выбор лучшей альтернативы.

На первом этапе с применением современных средств мониторинга собирается вся доступная на момент принятия решения информация о некоторой ситуации: фактические оперативные данные, статистическая и экспертная информация. Второй этап связан с определением того, что можно, а чего нельзя делать в имеющейся ситуации, то есть с определением вариантов решений (альтернатив). Третий этап включает в себя сравнение альтернатив и выбор наилучшего варианта (или вариантов) решения. При использовании автоматизированных средств поддержки принятия решений технологию принятия решений (рис. 1) целесообразно дополнить еще двумя этапами: этапом формализации задач и этапом визуализации «подготовленного» экспертами варианта для предъявления лицу, принимающему решение (ЛПР). Формализация подразумевает «перевод» сформулированной ЛПР задачи на язык, «понятный» компьютеру, представление ее в виде, допускающем только однозначную интерпретацию. Визуализация призвана обеспечить обратную процедуру – перевод спецификации решения, полученной на формальном компьютерном языке, в представление, понятное и легко интерпретируемое ЛПР.

При исследовании крупномасштабных динамических систем, к которым

относятся региональные социально-экономические системы, возможности сбора информации путем наблюдений, натурных измерений и экспериментов существенно ограничены, и преобладающую роль на этом этапе играет компьютерное моделирование и специальные средства мониторинга и автоматизации управления. Компьютерное моделирование является основным инструментом, помогающим на основе прогнозирования не только получить обоснования для стратегических решений и сформировать программы их реализации, но и обеспечить анализ хода реализации программ, оценку степени критичности возникающих отклонений от намеченных траекторий развития и, при необходимости, оперативный поиск корректирующих воздействий.



Рисунок 1 – Структура технологии принятия решений при использовании средств информационно-аналитической поддержки

Структурно и функционально схожая технология поддержки принятия решений, но основанная на комбинированном использовании методов системно-динамического и мультиагентного имитационного моделирования [3] в процедурах оценки альтернатив, реализована для задач сетцентрического управления региональной безопасностью. В частности, технология обеспечивает мониторинг, согласование и оценку динамики показателей состояния критически важных объектов (КВО) региональной экономики и предназначена для использования в составе систем поддержки принятия решений ситуационных центров региона.

Общая схема принятия решений по оценке состояния КВО региона на основе предлагаемой технологии в региональном ситуационном центре показана на рисунке 2.

Обозначения на рисунке 2: КМПО – концептуальная модель предметной области; СД-модель – системно-динамическая модель.

Технология реализуется в пять этапов:

- 1) сбор первичной информации о состоянии КВО региона в условиях возникновения кризисных ситуаций;
- 2) аналитическая обработка и аппроксимация информации о критических

ситуациях на КВО региона с применением средств интеллектуального анализа данных;

3) сценарное моделирование динамики состояния КВО и анализ вариантов развития кризисных ситуаций с комбинированным применением методов системной динамики [5] и энтропийно-робастного рандомизированного прогнозирования [6];

4) оценка интегральных показателей состояния КВО и последствий (ущерба) воздействия неблагоприятных факторов;

5) интерпретация результатов и формирование рекомендаций (программ управления) ЛПР.

6)

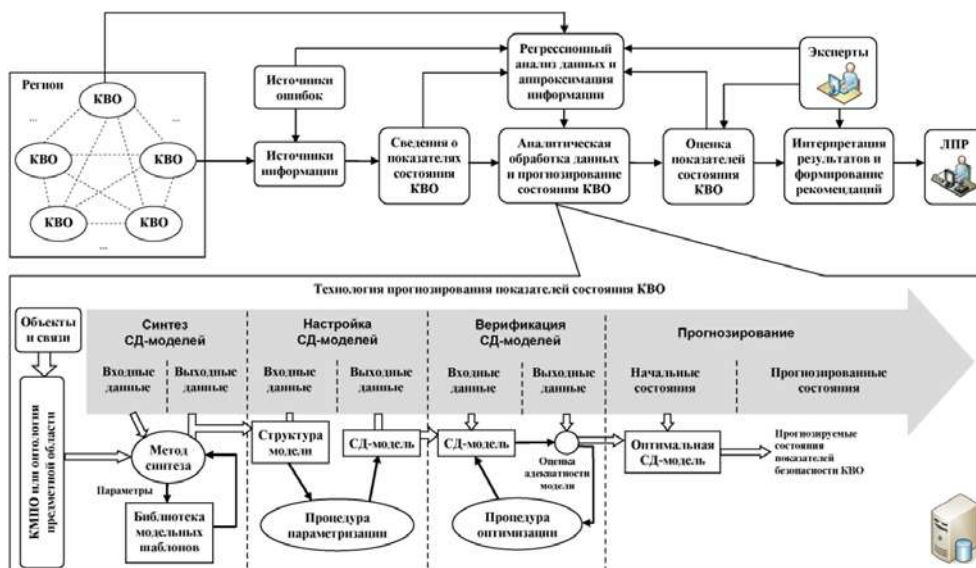


Рисунок 2 – Общая схема технологии принятия решений по оценке состояния КВО в ситуационном центре региона

Источниками информации о состоянии КВО региона являются: ведомственные и корпоративные информационные системы, базы и картотеки данных ФСТЭК, ФСБ, МВД, Федеральной службы государственной статистики, файловые системы и электронные архивы Минэкономразвития, Минприроды и других органов государственной власти и организаций региона, а также открытые веб-ресурсы, картографическая информация, контент социальных сетей, каналы аудио и видеoinформации, экспертные данные и научно-техническая документация. Эта информация поступает на вход системы поддержки принятия решений, которая функционирует на основе предлагаемой технологии. Информация может быть представлена как в структурированном, так и в неструктурированном виде, а также может быть неполной, поскольку зачастую на практике не все показатели безопасности поддаются точному количественному измерению.

Информация, требуемая для принятия управленческих решения, характеризуется, как правило, объемом и неопределенностью. Эти показатели взаимосвязаны. Неопределенность информации выражается через энтропию и заключа-

ется в том, что не все значения параметров управляемой системы неизвестны на момент принятия решения. Таким образом, процедура принятия решений представляет собой итеративный процесс последовательного разрешения неопределенности информации путем ее обработки и анализа.

Информацию, используемую в процессе принятия решений, можно условно разделить на три группы [7]:

- 1) Потенциально готовая к использованию информация, заранее накопленная в системе управления. Неопределенность этой информации характеризуется ее неполнотой, неполной достоверностью и неполным соответствием содержанию решения. Эта информация используется, когда отсутствует резерв времени на полный сбор и обработку сведений о параметрах объекта управления, либо в случае, когда такие данные трудно доступны.
- 2) Оперативная информация, получаемая непосредственно в процессе принятия решений. Эта новая информация генерируется путем аналитической обработки всей известной информации об объекте управления или ситуации с использованием методов интеллектуального анализа данных и прогнозирования, а также формальных моделей предметной области.
- 3) Информация, которая не может быть получена какими-либо объективными методами. Неопределенность этой информации называется остаточной неопределенностью решения и разрешается путем субъективного выбора (волевым решением).

Информационный мониторинг проводится в режиме максимально приближенном к реальному времени и сопровождается контролем целостности входных данных и проверкой их достоверности. Сбор первичной информации осуществляется с применением автономных программных агентов [8]. После получения, регистрации и обработки первичной информации о потенциальных источниках угроз на КВО региона и возможных кризисных ситуациях выполняется передача результатов предобработки в операционное ядро системы поддержки принятия решений для дальнейшего учета и анализа.

Центральным этапом технологии поддержки принятия решений является процедура моделирования и прогнозирования. Технически этот функциональный блок реализован в виде полимодельного комплекса, представляющего собой взаимосвязанную совокупность компьютерных моделей [9], обеспечивающих вариабельность проведения имитационных экспериментов с целью исследования различных сценариев развития кризисных ситуаций, оценки рисков, выявления тенденций и формирования антикризисных программ управления. Основные задачи на этом этапе технологии – прогноз динамики показателей безопасности социально-экономической системы региона и синтез моделей взаимодействия и координации субъектов управления в условиях известных и вновь возникающих кризисных ситуаций. Принятие решения осуществляется по полученным прогнозным оценкам состояния КВО региона, которые формируются на основе множества признаков, представленных в виде концептуального пространства (признакового описания ситуаций) [10].

Блок-схема метода совмещенного формирования и оценки интегрального показателя безопасности региона, реализуемого в рамках предлагаемой технологии приведена на рисунке 3.

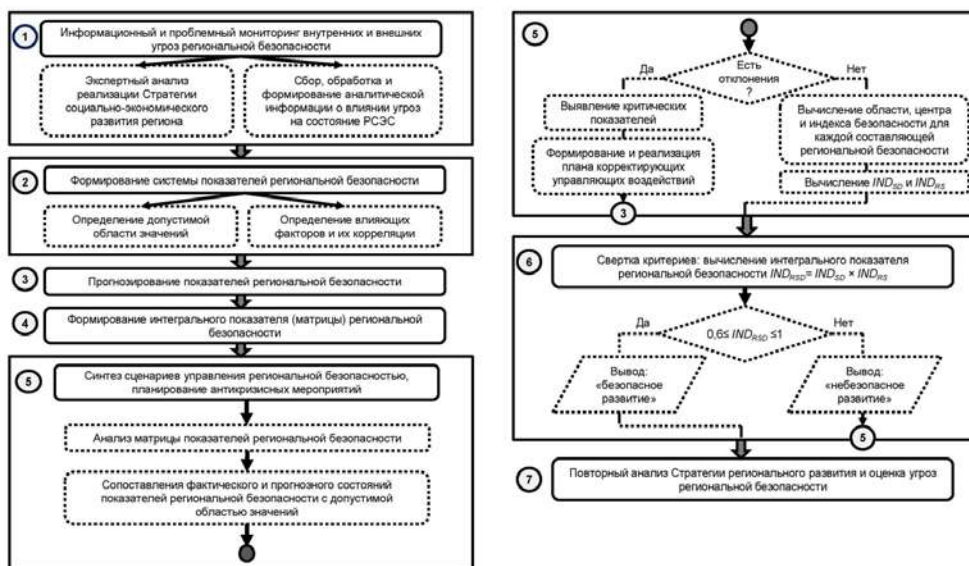


Рисунок 3 – Структура метода интегральной оценки региональной безопасности

Процесс функционирования социально-экономической системы региона представляется последовательностью смены состояний КВО, которые определяются вероятностным сценарием возникновения и развития неблагоприятных событий. Поэтому, в общем случае задача определения состояния КВО региона (а по нему и текущей ситуации) по регистрируемым признакам относится к задачам классификации. При этом зависимость состояния КВО от вектора наблюдений носит вероятностный характер и определяет возможный класс ситуаций, к которому относится неблагоприятное событие. Для классификации состояния КВО региона в предлагаемой технологии поддержки принятия решений по наблюдаемым значениям концептуального пространства совместно используются специальные методы когнитивной категоризации и ситуационного моделирования, предложенные в работах [1, 10] и позволяющие учитывать динамику изменения состояний КВО. Классификация и обобщение ситуаций осуществляется путем определения их сходства с прототипом. Экземпляры выше некоторого порога сходства с прототипом принимаются как члены категории, все остальные экземпляры не являются членами. Прототипом не всегда служит один из реальных экземпляров, входящих в категорию, это может быть и некоторый идеальный набор значений атрибутов. Вероятности возникновения неблагоприятных событий определяются на основе: теоретических выводов, экспертных оценок, статистических данных.

В рамках технологии отдельным блоком с привлечением компетентных экспертов и системных аналитиков соответствующего профиля реализуются процедуры:

- экспертного анализа реализуемой региональными органами управления стратегии социально-экономического развития региона с целью определения задач и проблем региональной безопасности;
- формирования системы показателей региональной безопасности, оп-

ределения допустимой области их значений и единиц измерения, влияющих факторов и их корреляции для каждой составляющей региональной безопасности.

– синтез сценариев управления безопасностью региона в условиях критических ситуаций на основе анализа матрицы показателей региональной безопасности и выбора оптимального сценария антикризисных мер, адекватного этим ситуациям.

Схема системы мониторинга региональной безопасности

На практике процесс управления предполагает не только принятие управленческого решения и его воплощение в жизнь, а также отслеживание и оценку реакции объекта управления на управляющее воздействие. Эффект от управления определяется не только качеством решения, но и качеством его реализации. В сложных системах, характеризующихся принципиальной неполнотой и противоречивостью информации, «правильное» решение принятое, в некоторый момент времени, может утратить свою адекватность в процессе реализации по причине объективных изменений как самой управляемой системы, так и внешней среды. Поэтому непрерывный мониторинг и контроль управляемой системы являются важными составляющими процесса управления и предлагаемой технологии поддержки принятия решений.

С точки зрения управления безопасностью региона основной задачей мониторинга является сбор информации для контроля хода реализации стратегии и программ социально-экономического развития региона. Организация мониторинга должна обеспечивать возможность оценки показателей безопасности региона, характеризующих состояние региональной социально-экономической системы, на основе набора измеряемых параметров. В качестве формализованных показателей мониторинга используется перечень целевых и контрольных показателей решения задач, определяемых стратегией регионального развития, общих и специфичных для каждого отдельно взятого региона.

Базисом для системы информационного мониторинга является используемая региональными органами государственной власти информационно-аналитическая система «Прогноз» компании Prognoz.

Анализ результатов системного мониторинга позволяет оценить соответствие текущей ситуации реализуемому сценарию. Региональные социально-экономические системы по своей природе являются недетерминированными, что неизбежно ведет к отклонениям текущих значений показателей от значений, заданных сценарием. Чтобы оценить уровень критичности текущих отклонений для реализации сценария и определить возможные управляющие воздействия для компенсации отклонений используется компьютерное моделирование.

Общая схема мониторинга включает следующие этапы (рис. 4):

1. сбор данных о текущем состоянии КВО социально-экономической системы региона;
2. обобщение первичных данных с целью формирования интегральных показателей безопасности, характеризующих ход реализации стратегии устойчивого развития региона;
3. сравнительный анализ текущих показателей и индикаторов, определенных реализуемой стратегией устойчивого регионального развития с целью выявления отклонений и оценки степени критичности этих отклонений;

4. в случае выявления отклонений, ставящих под угрозу успешность реализации стратегии устойчивого развития региона, поиск управляющих воздействий, позволяющих либо полностью ликвидировать негативные отклонения, либо минимизирующих их отрицательное воздействие на достижение целевых показателей;
5. в случае существенных изменений неуправляемых внешних или внутренних факторов, влекущих невозможность достижения целевых показателей развития региона в рамках реализуемого сценария, поиск вариантов перехода на другой сценарий развития, обеспечивающий максимальное приближение к целевым значениям показателей;
6. выбор вариантов корректирующего управления, обеспечивающих максимальное приближение достигаемых показателей социально-экономического развития региона к целевым показателям, принятие необходимых управленческих решений и мер по их практической реализации.

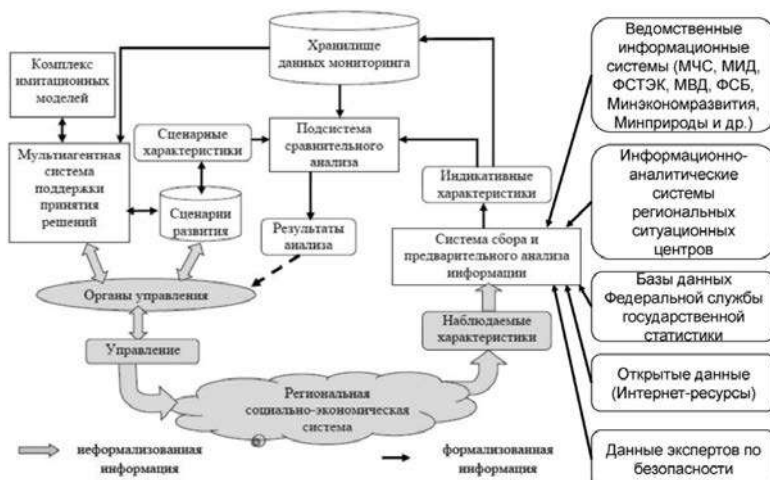


Рисунок 4 – Структурная схема информационного мониторинга хода реализации стратегии регионального развития в системе управления безопасностью региона

Заключение

В ходе исследования получены следующие результаты:

1. Выявлены объективные противоречия между нарастающими потребностями в повышении эффективности управления устойчивым развитием региональных социально-экономических систем, динамично меняющимися требованиями к системам обеспечения региональной безопасности и современными средствами информационной поддержки принятия решений в этой сфере.

2. Предложена новая технология поддержки принятия решений в сфере управления региональной безопасностью, отличающаяся структурой и методом реализации аналитической подсистемы прогнозирования и оценки показателей состояния КВО региона в блоке принятия решений системы сетецентрического управления регионом, а также наличием формальных процедур согласования локальных решений сетецентрического управления по оптимизации этих показателей на всех уровнях принятия решений. Аналитическая подсистема совместно

использует методы системной динамики и энтропийно-робастного рандомизированного прогнозирования для сценарного моделирования динамики состояния КВО региона и анализа вариантов развития региональных кризисных ситуаций. Согласование децентрализованных управленческих решений и целевых функций субъектов управления осуществляется на основе метода координации путем развязывания взаимодействий между управляющими центрами и формирования коалиций (путем самоорганизации) между активными элементами многоуровневой системы управления регионом (агентами).

Результаты исследования нашли применение при решении задач ситуационного управления безопасностью Мурманской области.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0235-2014-0008). Научное обоснование и программная реализация разработок поддержаны РФФИ (проекты 18-07-00167-а, 18-29-03022-мк).

Дальнейшие исследования связаны с разработкой методологии компьютерного моделирования систем сетцентрического управления региональной безопасностью и совершенствованием существующих моделей функционирования системы распределенных ситуационных центров региона на основе применения мультиагентных технологий.

Литература

1. Endsley M.R. Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 2015. Vol. 9., No. 1. P. 101-111.
2. Игнатъев М.Б. Просто Кибернетика // СПб: «Страта», 2016. 248 с.
3. Маслобоев А.В. Применение метода системной динамики при разработке мультиагентных систем поддержки принятия решений // Информационные системы и технологии, 2019. № 1(111). С. 37-45.
4. Simon H.A. The new science of management decision // Prentice-Hall, 1977. 175 p.
5. Форрестер Дж. Мировая динамика // М.: Наука, 1978. 165 с.
6. Попков Ю.С. Математическая демоэкономика: макросистемный подход // М.: Ленанд, 2013. 560 с.
7. Цыгичко В.Н. Выбор рациональной структуры систем поддержки принятия решений в организационных системах // Евразийское Научное Объединение, 2018. Т. 1. № 7(41). С. 36-40.
8. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition // John Wiley & Sons, 2009. 484 p.
9. Путилов В.А., Маслобоев А.В., Быстров В.В. Комплекс имитационных моделей поддержки управления региональной безопасностью // Надежность и качество сложных систем, 2018. № 3(23). С. 143-158.
10. Фридман А.Я. Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем // Методы и модели. Saarbrucken, Germany: LAP. 2015. 530 с.

УДК.004.942

Оценка эффективности работы центра обслуживания вызовов с использованием аналитики больших данных

М.Ю. Неустроев, аспирант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Оценку качества работы центров обработки вызовов (ЦОВ) можно описать как процесс прослушивания записанных разговоров между оператором или службой технической поддержки и обратившимся клиентом с целью оценки эффективности работы оператора и его производительности. Основная проблема контроля качества заключается в том, что у менеджеров или супервизоров нет времени прослушивать все записи, и поэтому выбираются случайным образом только несколько из общего числа сохраненных записей разговоров. Это приводит к неточным измерениям производительности, так как большинство записей вызовов не прослушиваются. В данной статье представлена распределенная система мониторинга вызовов для оценки всех записанных вызовов с использованием нескольких критериев качества. В предлагаемой системе мы анализируем большое количество записей вызовов, используя популярную платформу Hadoop MapReduce, и используя текстовые алгоритмы, такие как косинусное преобразование и N-грамма. Были также интегрированы списки сленговых слов в систему мониторинга. Эмпирические записи вызовов используются для демонстрации производительности предлагаемой системы мониторинга вызовов.

ЦОВ, колл-центр, анализ данных.

Evaluate call center performance using Big Data Analytics

M.Yu. Neustroev, post-graduate student,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

An assessment of the quality of call centers (CCS) can be described as the process of listening to recorded conversations between an operator or technical support service and a customer to assess the effectiveness of the operator and its performance. The main problem with quality control is that managers or supervisors do not have time to listen to all records, and therefore only a few of the total number of saved conversation records are randomly selected. This leads to inaccurate measurements of performance, since most of the records of calls are not tapped. This article presents a distributed call monitoring system to evaluate all recorded calls using multiple quality criteria. In the proposed system, we analyze a large number of call records using the popular Hadoop MapReduce platform, and using text algorithms such as cosine transformation and N-gram. Lists of slang words were also integrated into the monitoring system. Empirical call records are used to demonstrate the performance of the pro-

posed call monitoring system.

Call center, data analysis, Big data.

Введение

Сегодня большой объем информации собирается и хранится в неструктурированном или полуструктурированном формате, таких как Viber, WhatsApp, страницы Facebook, электронные письма клиентов, записи разговоров в ЦОВ, блоги, форумы и другие ресурсы. Текстовая аналитика стремится извлечь полезную и новую информацию из этих данных для использования в различных приложениях, таких как бизнес-аналитика, медиа-аналитика, управление взаимоотношениями с клиентами (CRM) и прогнозная аналитика. Получение текстовых данных с использованием традиционных методов машинного обучения, обработки естественного языка, поиска информации и управления знаниями сопряжено со многими трудностями из-за различных языковых особенностей и проблем с большими данными [1].

Проблемы с большими данными в основном связаны с особенностями данных, а именно с разнообразием, объемом, скоростью, достоверностью и стоимостью. Разнообразие относится к неструктурированным данным в различных формах, таким как электронные письма клиентов, данные социальных сетей, аудио и видео данные, объем относится к большим объемам данных, скорость относится к тому, как быстро генерируются данные и как быстро их нужно анализировать. Достоверность данных или их надежность в принятии важных решений играют особую ценность, а наиболее важная составляющая больших данных, относится к ценности данных, хранящихся в различных организациях.

Поскольку объем набора данных растет в геометрической прогрессии, становится относительно важным выбрать передовые аналитические методы, работающие с большими наборами данных, которые также называют аналитикой больших данных. Аналитика больших данных, комбинация больших данных и аналитика, показанная на рисунке 1, оказала огромное влияние на повышение производительности, доходов и удовлетворенности клиентов, снижение затрат и времени, а значит, и обеспечение качества для организаций. Хотя новых технологий стало еще больше, чем когда-либо, многие организации все еще ищут варианты оптимизации производительности набора данных, которые поступают в ЦОВ. Платформа MapReduce стала одним из основных вариантов эффективного анализа такого большого объема данных. MapReduce – самая популярная парадигма для обработки больших данных, была реализована в проектах с открытым исходным кодом, таких как Hadoop. Hadoop предоставляет гибкую и масштабируемую среду для анализа структурированных и неструктурированных данных и распределяет данные на независимых дисках с использованием распределенной файловой системы Hadoop (HDFS) отказоустойчивым способом [2].

В этой статье рассматриваются проблемы мониторинга и анализа записей вызовов оператора ЦОВ. Основная цель этого исследования - проанализировать все записанные вызовы и измерить производительность оператора, используя методы анализа больших данных и интеллектуального анализа текста. В частности, мы стараемся обеспечить следующие ключевые преимущества:

- Превратить данные клиента с записями вызовов в значение.
- Получить новые варианты для принятия оптимальных решений.
- Получить конкурентное преимущество и больше времени.
- Добиться значительной экономии средств.
- Увеличить доход и степень удовлетворенности клиентов.
- Представить надежную систему мониторинга, обеспечивающую точные измерения производительности путем анализа всех входящих и исходящих вызовов [3].

Текущая ситуация

Центры телефонного обслуживания предоставляют услуги для разных секторов, таких как телекоммуникации, ситуационные центры, финансы, транспорт, здравоохранение, автомобилестроение и т. В нескольких исследованиях были предложены различные подходы и решения проблемы оценки эффективности операторов. Также проанализированы записанные звонки из офиса бронирования проката автомобилей с помощью функции обнаружения триггера данного сегмента, чтобы выяснить, намерен ли клиент забронировать автомобиль или нет. Предложена система мониторинга ЦОВ, которая использует методы анализа текста и поиска информации. Система используется для анализа содержания разговоров в ЦОВ и выявления основной проблемы, решаемой в поступающих вызовах. Рассматривалась система анализа речи, адаптированная к технологиям автоматического распознавания речи и интеллектуального анализа текста для записей в ЦОВ. В отличие от современного подхода к анализу речи и интеллектуальному анализу текста, исследование представило инструмент анализа взаимодействия, основанный на прагматическом анализе для анализа в ЦОВ. Инструмент применяется для набора из 213 переписанных вручную разговоров ЦОВ службой поддержки в банковском секторе [4].

Работа оператора ЦОВ

Центр обработки вызовов является важной частью управления взаимоотношениями с клиентами, которая состоит из людей, процессов, технологий и стратегий. Качество обслуживания в ЦОВ – это результат сравнения фактических результатов обслуживания и ожиданий клиентов. Оценить качество обслуживания, которое предлагает оператор по обслуживанию клиентов, сложнее, чем оценить качество продукта. Оценка эффективности в центрах обработки вызовов обычно выполняется путем прослушивания случайно выбранных вызовов из записанных вызовов и оценки слов одно за другим в соответствующем разговоре. Однако такая оценка имеет свои недостатки с точки зрения времени и затрат, поскольку супервизоры должны прослушивать записанные разговоры, и только несколько вызовов подвергаются оценке.

Таким образом, существует очевидная потребность в системах автоматической оценки эффективности, позволяющих снизить затраты сотрудников и повысить эффективность использования времени. Традиционные подходы имеют ограничения с точки зрения хранения и анализа контента, когда возникает необходимость обрабатывать сотни разговоров параллельно.

Предлагаемая система использует технологии больших данных для хранения всех записанных разговоров и анализа их с использованием методов анализа распределенного текста. Виртуальные машины, необходимые для работы

распределенной системы хранения и анализа, работают в облаке, что позволяет нам масштабировать систему в соответствии с количеством входов.

Измерение производительности оператора центра обработки вызовов с использованием предложенной системы представляет следующие основные положения в центры обработки вызовов:

1) Технологические инновации: создание надежной и масштабируемой области хранения записей вызовов, выполнение автоматического и метрического анализа для всех разговоров, представление системы раннего предупреждения для менеджеров, автоматическая оценка производительности операторов обслуживания клиентов и ежедневные, еженедельные, ежемесячные отчеты анализа производительности [5].

2) Сокращение расходов на сотрудников: затраты на сотрудников будут снижены, поскольку записи вызовов автоматически анализируются.

Показатели эффективности

Следующие показатели производительности используются для оценки производительности оператора:

- Оценка продолжительности ответа операторов на входящие вызовы и их ежедневный объем обработанных вызовов (скорость ответа на вызовы).
- Оценка того, сколько вызовов достаточно, чтобы найти решение проблемы и есть ли какие-либо совпадающие вызовы или нет (скорость удовлетворения требований).
- Оценка разговоров с оценочной системой (достоверность).
- Оценка того, произнесены ли приветственные и заключительные слова, которые необходимы, или нет.
- Используются ли жаргонные слова или нет (поручительство).

Методы и технологии

В предлагаемой системе используются следующие технологии:

- Создана облачная инфраструктура специального назначения (OpenStack). Следовательно, записанные звонки могут обрабатываться и храниться параллельно.
- Записанные звонки преобразуются в текстовые файлы с помощью Яндекса Speech Kit, а преобразованные данные хранятся в распределенной файловой системе.
- HBase (масштабируемая, распределенная база данных NoSQL для больших данных, работающая на Hadoop), Hive (система бизнес-аналитики, работающая с большими данными), Mahout (библиотека масштабируемого машинного обучения и интеллектуального анализа данных), Pig (язык потоков данных высокого уровня и библиотека реализации для параллельных вычислений), технологии ZooKeeper (высокоуровневое координационное приложение для распределенных реализаций) и алгоритмы сходства косинус и n-грамма используются для анализа больших данных о структуре облака.
- JSF (Java Server Faces) и PrimeFaces (библиотека CSS-JS), MongoDB (база данных NoSQL на основе документов) используются для разработки пользовательского интерфейса.

Анализ больших данных

В последние годы аналитика больших данных использовалась для анализа больших (разных размеров от терабайта до эксабайта) и сложных наборов данных, которые требуют огромных вычислительных мощностей, емкости хранения и пропускной способности сети. Аналитика больших данных, включая анализ текста, интеллектуальный анализ данных и методы обработки естественного языка, позволяет исследователям и бизнес-аналитикам принимать оптимальные решения.

Большие данные

Apache Hadoop в качестве реализации модели MapReduce с открытым исходным кодом стал заметным решением для обработки и хранения больших данных. Hadoop состоит из двух основных частей: распределенной файловой системы Hadoop (HDFS), в которой по умолчанию хранятся входные и выходные файлы, и инфраструктуры MapReduce, которая обрабатывает большие объемы данных. HDFS поставляется с двумя компонентами, один главный узел, известный как NameNode и подчиненные узлы, известные как узлы данных. NameNode отвечает за хранение метаданных HDFS, в то время как DataNode хранит реальные данные в HDFS. MapReduce Framework предлагает множество функций, которые включают отказоустойчивость, автоматическое распараллеливание, масштабированность и оптимизацию данных на основе локальных данных. Задания MapReduce разделяются на две функции: Map и Reduce. Функция Map делит входные данные на группу пар ключ-значение, а выходные данные каждой задачи сортируются по их ключу. Функция Reduce объединяет значения в конечный результат. MapReduce может быть реализован на различных языках программирования.

Большие данные считают сбор данных, размер которых увеличивается с невероятными темпами роста. Такой большой набор данных не может эффективно управляться традиционными системами управления реляционными базами данных (рис. 1). Чтобы справиться с этой проблемой, системы управления базами данных NoSQL представляют собой распределенное решение, которое имеет согласованность, высокую доступность и высокие характеристики допуска разделов. Базы данных NoSQL были классифицированы по трем популярным категориям: хранилища ключей, такие как SimpleDB, ориентированные на столбцы базы данных, такие как HBase, Cassandra, и хранилища документов, такие как MongoDB. Базы данных NoSQL имеют следующие преимущества перед реляционными базами данных:

- Базы данных NoSQL обычно обрабатывают большие данные быстрее и более эффективно, чем реляционные базы данных.
- Они предоставляют легко масштабируемые и большие объемы данных. хранилище для записи данных о вызовах, документов и электронной почты архивы, веб-журналы, данные взаимодействия социальных сетей.
- Они предлагают автоматическое переключение при сбое и восстановление, более простое распределение данных, гибкость и простоту модели данных, высокая доступность и интеграцию с Hadoop / MapReduce.
- Базы данных NoSQL являются открытыми и недорогими. Они используют более дешевые серверы и системы хранения для управления большими

данными и транзакциями, в то время как оборудование и требования к хранению реляционных баз данных намного выше.

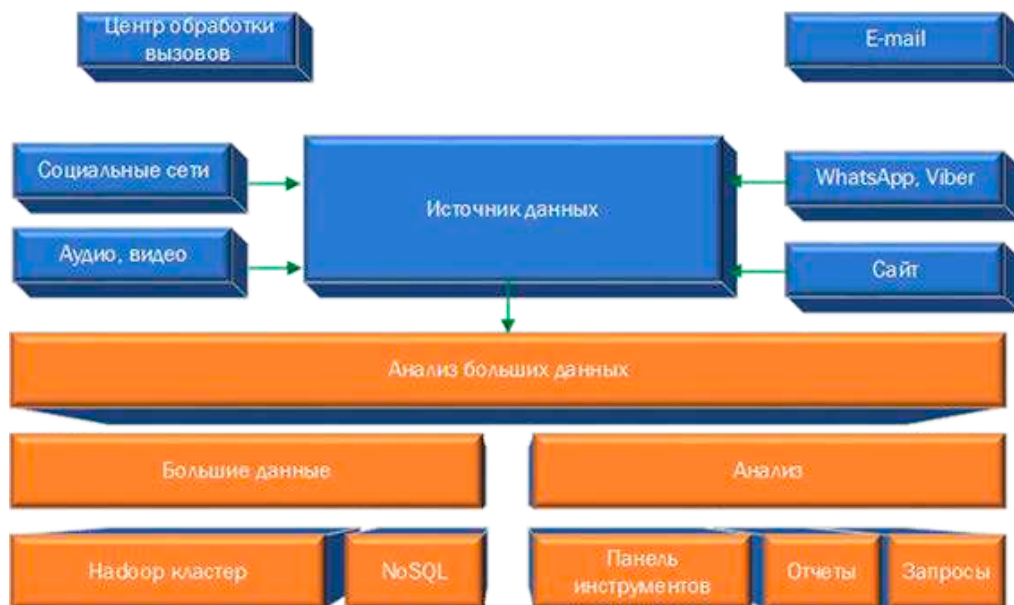


Рисунок 1 – Обзор аналитики больших данных

Речевая аналитика

Речевая аналитика относится к процессу автоматического анализа всех записанных звонков, чтобы извлечь полезную и новую информация от операторов и клиентов. Процесс аналитики обычно выполняется в три этапа: автоматическое распознавание речи, обработка естественного языка и анализ текста. Первый шаг речевой аналитики – трансформация аудио записи в текстовые данные. Обработка естественного языка включает обнаружение границ предложений, токенизации и извлечение сущностей для обработки методов полученного текста. На данном этапе вводится программное обеспечение для анализа речи, предоставляя такие критерии качества, как точность, полнота и надежность с целью мониторинга и управления производительностью [6].

Сходство текста

Измерения больших данных имеют широкий диапазон научного интереса, включая информационно-поисковые системы, искусственный интеллект и обработку естественного языка. Новые исследования в этой области направлены на выполнение надежных, точных и эффективные вычислений больших текстовых данных. Большинство популярных алгоритмов для анализа подобия были кратко представлены в:

1) Косинусное сходство: когда текст представлен как вектор всех слов в векторном пространстве, косинус угла между двумя векторами указывают на сходство текста, давая значение между ними. Косинусное сходство, также используемое в этом исследовании, является мерой сходства, которая является простой и эффективной техникой для оценки сходства текста.

2) N-грамма: измерения на основе N-граммы вычисляют количество общих n-грамм между двумя строками. Результат сходства получается путем деления числа похожих n-грамм к общему количеству n-грамм.

Тесты, запущенные на кластере Hadoop, показали, что сходство косинусов предложило лучшую производительность, чем другие измерения на основе меры Жаккара и Расстояние Левенштейна. Чтобы сравнить измерения сходства, текстовые записи разговоров между клиентами и операторами были проверены на схожесть predetermined приветствия и заключительного предложения. Сходство косинусов было принято с анализом записанных телефонных разговоров и измерена производительность оператора в соответствии с заранее определенными метриками.

Предлагаемая система

В этой статье мы предлагаем новую систему мониторинга вызовов для анализа всех записанных телефонных разговоров, которые проводятся между операторами и клиентами в центрах обработки вызовов. Обзор предлагаемой системы подробно показан на рисунке 2.

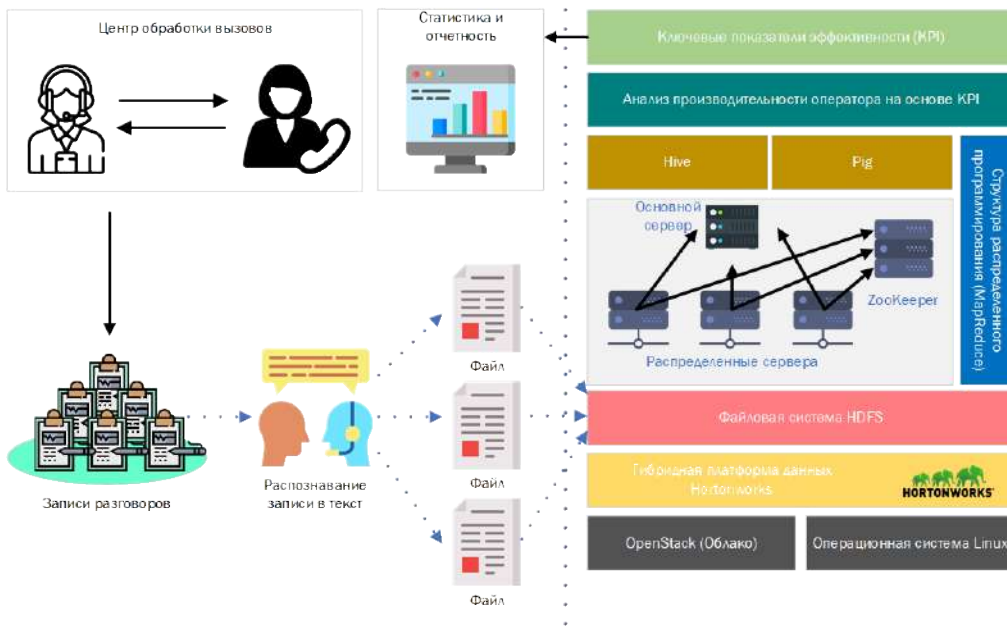


Рисунок 2 – Архитектура системы

Архитектура системы может быть разложена на три части, а именно: преобразование и хранение данных, анализ данных, скоринговая оценка и статистика эффективности операторов в обслуживании клиентов.

Преобразование и хранение данных вызовов

Предлагаемая система нуждается в распознавании речи в текстовые записи.

Есть несколько систем распознавания речи, таких как Google Speech API, Яндекс SpeechKit. Мы используем Яндекс SpeechKit для преобразования аудиоданных в текстовые данные. Также должно быть отмечено, что предлагаемая

система не зависит от Яндекс SpeechKit или других технологий распознавания речи. Это работа сосредоточена только на анализе разговоров ЦОВ.

Кроме того, мы используем Apache HBase, который является базой данных NoSQL, построенный на базе Hadoop, чтобы хранить записи разговоров ЦОВ. Анализ результатов разговоров между операторами и клиентами хранятся в таблицах HBase и записываются в формате XML (рис. 2.), чтобы сделать наш пользовательский интерфейс максимально простым в использовании.

Анализ данных звонков

Центры обработки вызовов обычно используют ключевые показатели для анализа общения с клиентами. Некоторые показатели были проанализированы по предлагаемой системе ниже:

1) Обнаружение сленговых слов: оператор может использовать сленг слово или слова во время разговора между оператором и клиентом. В случае, если клиент использует жаргонные слова, оператору следует предупредить клиента как минимум два раза и при необходимости оператор вправе прекратить общение. Для того, чтобы обнаружить сленговое слово, мы создали список сленговых слов и словосочетаний и поместили их в базу данных HBase. Затем слова в тексте разговоров были сравнены со списком сленговых слов и проведена проверка использования их оператором или клиентом.

2) Приветствие и завершение диалога: есть открывающие и закрывающие модули, которые должны взять представители заказчика на учет в ЦОВ. В этих модулях есть стандартные вводные и закрывающие предложения. Предложения, которые используются операторами должны соответствовать регламентированным и заранее созданным шаблонам. Для измерения подходящего приветствия и заключительного предложения было вычислено косинусное сходство между предопределенными предложениями изв текста разговоров.

3) Повтор имени клиента: в разговоре, оператору следует спросить имя клиента, прежде чем начать диалог. В современных колл-центрах внедренная система CRM позволяет оператору выдать полную карточку клиента перед ответом.

4) Повторение предложения: оператору иногда требует повторить предложения клиента из-за плохого телефонного соединения. Это может рассматриваться как потеря времени и проблема в производительность оператора.

5) Обнаружение запрещенных слов: в колл-центрах есть некоторые слова (стоп-слова), которые не рекомендуется использовать или полностью запрещены к употреблению. Некоторые факторы, такие как способ использования и произношение слов и способ помещения их в предложения могут сделать их уместными, но оператор должен избегать их использование. Некоторые примеры этих запрещенных слов могут быть; «к сожалению, мы отказываемся, я не могу, невозможно, мне жаль, алло, как бы, говорите» и т.д. Для того, чтобы обнаружить запрещенные слова, был создан список «banned_words». Затем разговор был проверен на использование оператором каких-либо забаненных слов.

6) Злые клиенты: иногда, во время разговора, клиенты могут быть слишком агрессивными из-за некоторых ошибок или возникших у них проблем. В этих случаях оператор должен успокоить клиента. Если оператор не может успокоить клиента, после предупреждения как минимум два раза, наилучшей воз-

можной практикой может быть прекращение разговора. Чтобы определить, предупредил ли оператор клиента, мы измеряем косинусное сходство, сравнивая разговор с предупредительными предложениями. Затем предупреждение оператора вычисляется и сохраняется в базе данных.

Результаты производительности

В настоящем исследовании представлена распределенная система мониторинга вызовов для оценки всех зарегистрированных вызовов путем предоставления таких критериев качества, как точность, полнота и надежность управления качеством вызовов. Для достижения высокой масштабируемости, мы использовали реализацию Hadoop MapReduce для анализа большого количества звонков. Мы проводим эксперименты на 10-узловом кластере Hadoop, построенном на OpenStack, облачном программном обеспечении с открытым исходным кодом. Каждый узел был установлен на операционной системе Ubuntu 14.04 LTS, которая является рекомендованной операционной системой для OpenStack. Если супервизор хочет увидеть оценки производительности оператора, он может ввести идентификатор оператора, дату начала и дату окончания внутри соответствующих текстовых полей, и система обработает файл запроса по оператору в формате XML и покажет в виде графического вывода.

Таким образом, предлагаемая система обеспечивает высокие преимущества с системой раннего предупреждения для супервизоров.

Заключение

В этой статье мы представили распределенную систему для оценки эффективности работы операторов колл-центра. Предлагаемая система реализована на платформе Hadoop с использованием аналитик больших данных. Наша система обеспечивает эффективный автоматический анализ всех разговоров колл-центра и интерфейс мониторинга для операторов. Основной проблемой в нашем исследовании является отсутствие хранилища записи звонков. Мы динамически построили систему в кластере Hadoop, работающую в облачной инфраструктуре, которая позволяет нам масштабировать систему в соответствии с количеством обработанных записей вызовов.

Литература

1. Неустроев М.Ю. Роль информационных технологий в социальной коммуникации // Пенза: Изд-во МЦИИ «Омега сайнс», 2016. С. 25-28.
2. Неустроев М.Ю. Анализ показателей эффективности и скорости обслуживания в центрах обработки вызовов // Информационные технологии, 2016. № 6. С. 416-422.
3. Неустроев М.Ю. Анализ производительности при обращении в центр обработки вызовов // Информационно-технологический Вестник, 2016. № 1(07). С. 73-83.
4. Неустроев М.Ю. Анализ показателей эффективности и скорости обслуживания вызовов в центрах обработки // Королев: Изд-во «Научный консультант», 2012. С. 231-237.
5. Неустроев М.Ю. Разработка корпоративной VoIP сети предприятия на платформе Asterisk // М., 2016. С. 100-153.

6. Неустроев М.Ю. Дифференцированный уровень обслуживания в мультисервисных центрах обработки вызовов с адаптацией серверов // Информационно-технологический Вестник, 2017. № 3(13). С. 106-117.

УДК 539/538.9

Моделирование эрозионных процессов в конструкционных материалах космических аппаратов при воздействии полиэнергетических пучков ионов

Часть 1 (Математическая модель и экспериментальные результаты)

С.Е. Сабо, кандидат технических наук, доцент,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

Н.В. Волков, доктор физико-математических наук, профессор,

Отделение ядерной физики и технологий офиса образовательных программ
(411), Институт ядерной физики и технологий,

Национальный исследовательский ядерный университет

«МИФИ» (НИЯУ МИФИ), г. Москва,

А.Д. Донской, доцент,

И.В. Бугай, кандидат технических наук, доцент,

Е.Д. Штрафина, доцент,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Проанализированы физические процессы радиационного воздействия на конструкционные материалы. Рассмотрены механизмы и зависимости взаимодействия ускоренных частиц с твердыми телами и процессы эрозии конструкционных материалов.

Ионное облучение, полиэнергетические пучки ионов, коэффициент распыления.

Simulation of erosion processes in materials of spacecraft when exposed to polyenergy ion beams

Part 1 (Mathematical model and experimental results)

S.E. Sabo, Ph. D., associate Professor,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

N.V. Volkov, doctor of physics Sciences, prof,

Department of nuclear physics and technology educational programs office (411),

Institute of nuclear physics and technology,

National Research Nuclear University MEPhI

(Moscow Engineering Physics Institute), Moscow,

A.D. Donskoy, Ph. D., associate Professor,

I.V. Bugay, Ph. D., associate Professor,

E.D. Shtrafina, Ph. D., associate Professor,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

Physical processes of radiation impact on structural materials are analyzed. Mechanisms and dependences of interaction of accelerated particles with solids and processes of erosion of structural materials are considered.

Ion irradiation, ion beams with a wide energy spectrum, sputtering coefficient.

Специфические условия работы деталей и узлов приборов и установок космических аппаратов заключаются в наличии высоких температур и потоков ионов с широким энергетическим спектром. При этом облучение происходит длительное время.

Актуальной задачей является изучение воздействия потоков ионов на материалы изделий, элементов приборов и установок при нормальных и повышенных температурах [1-3].

Не менее важными являются вопросы совместного влияния различного вида воздействий и возможностей их имитации и моделирования [4,5].

При прохождении ионов через твёрдые тела происходят столкновения с частицами среды, которые приводят к изменению направления движения ионов, торможению, смещению из узлов кристаллической решётки собственных атомов вещества, распылению поверхности и испусканию вторичных квантов и частиц.

Основными механизмами снижения энергии ионов являются:

- *Ядерные или упругие столкновения.* Этот механизм торможения преобладает при достаточно небольших скоростях ионов. Передача энергии между налетающей частицей и атомами мишени происходит в результате упругих столкновений, при этом образуются атомов отдачи, смещённые из положения равновесия.

- *Взаимодействие с электронами подложки.* Электронные потери основной механизм торможения для ионов высоких энергий. Неупругие, или электронные потери энергии частиц возникают в результате возбуждения электронов при прохождении быстрой частицы.

- *Генерация фотонов.* Излучение фотонов, приводящие к потерям энергии частицы проявляет себя при релятивистских скоростях.

- *Ядерные реакции.* Ядерные реакции происходят при соблюдении определенных условий соответствия налетающего иона и материала мишени и энергии налетающей частицы.

Для ионов с энергией не выше $E=10$ кэВ практически не генерируют фотонов и не участвуют в ядерных реакциях.

Потери энергии выражаются различными способами:

$$-\frac{dE}{dx}, (\text{эВ} / \text{нм}) - \text{тормозная способность вещества,}$$

$$-\frac{dE}{dx} * \frac{1}{N}, (\text{эВ} * \text{см}^2 / \text{атом}); - \text{сечение торможения от атомной плотности,}$$

сти,

$-\frac{dE}{dx} * \frac{1}{\rho}$, ($\text{эВ} * \text{см}^2 / \text{мкг}$). – сечение торможения от массовой плотности.

Полный пробег ионов можно определить по формуле [1]

$$R = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_e(E) + S_n(E)}, \quad (1)$$

где $S_e(E)$ и $S_n(E)$ – сечения неупругого и упругого торможения соответственно. Они определяются формулами [2-5]:

$$S_e(E) = \left[\frac{1}{1-m} \right] C \gamma^{1-m} E^{1-2m}, \quad m = 0 \div 1, \quad (2)$$

$$S_n(E) = 4\pi Z_1 Z_2 e^2 a_{12} \left[\frac{M_1}{M_1 + M_2} \right] s_n(\varepsilon), \quad (3)$$

где

$$\varepsilon = \frac{M_2 E / M_1 + M_1}{Z_1 Z_2 e^2 / a_{12}}, \quad (4)$$

$$a_{12} = 0,885 a_0 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-1/2}, \quad (5)$$

$s_n(\varepsilon)$ – универсальная табулированная функция (приведённое сечение упругого торможения).

Профили распределения имплантируемого вещества претерпевают изменения (от гауссообразной формы) из-за распухания и распыления мишени, ионного перемешивания, ускорения процессов диффузии и сегрегации, а также образования стабильных фаз.

Распыление подложки – один из основных механизмов, приводящих к изменению формы профиля имплантируемой примеси. При высоком коэффициенте распыления $S (S > 1)$ устанавливается динамическое равновесие, между имплантируемыми и распыляемыми атомами имплантата. При низком коэффициенте распыления $S < 1$ происходит значительное накопление примеси. Поскольку коэффициент распыления является функцией атомных номеров мишени и внедряемой примеси ионов, а кроме того существенно зависит от энергии имплантируемых ионов, то N_{\max} будет некоей функцией этих параметров.

Удобной для анализа повреждения кристалла быстрыми ионами является *каскадная функция* N_d , которая описывает количество смещений атомов в линейных каскадах. Интегральное уравнение баланса $N_d(E_2)$ обычно используют для вывода выражения каскадной функции:

$$\int \{N_d(E_2) - N_d(T) - N_d(E_2 - T)\} \sigma(T, E_2) dT = 0 \quad (6)$$

где E_2 – энергия первично выбитого атома (ПВА); T – энергия, переданная частицей с энергией E_2 при своем первом столкновении с атомами решетки; $(E_2 - T)$ – энергия, которую сохраняет ПВА после этого столкновения; $\sigma(T, E_2)$ дифференциальное сечение [3].

ПВА, образующиеся при столкновении с высокоэнергетическими иона-

ми, могут получить большую долю кинетической энергии. При этом необходимо учесть возбуждение электронов ПВА, так как часть их энергии будет затрачена на электронные потери.

В разное время предлагались различные механизмы, в разной степени объясняющие различные аспекты ионного распыления, в том числе и учитывающие нагрев подложки, однако в дальнейшем было показано, что определяющими является процесс атомных столкновений [3,4].

На сегодняшний день теорией, удовлетворительно описывающей распыление простых веществ и неплохо согласующейся с экспериментальными результатами, признается теория П. Зигмунда [4].

Несмотря на это вычисленные по теории Зигмунда и экспериментально полученные коэффициенты распыления могут отличаться в 2÷3 раза.

Развитие рельефа происходит из-за различных скоростей эрозии участков поверхности. Эрозионные механизмы зависят состояния и природы поверхности и налетающих ионов, а также условий имплантации. При имплантации металлических материалов ионами инертных газов при достаточно высокой температуре, когда происходит отжиг созданных облучением элементарных дефектов, преобладающим при формировании рельефа является механизм каскадных столкновений. Для большинства металлических материалов эта температура не более $T \approx 100^\circ\text{C}$. В случае материалов с низкой плотностью дислокаций $10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-3}$, основным рельефообразующим механизмом до температуры $T \approx 0,7T_{\text{пл}}$ остается распыление. При высокой плотности дислокаций $10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$, температурная снижается до $T = (0,3 \dots 0,4)T_{\text{пл}}$. Подобный диапазон температур характерен и для легированных материалов и тугоплавких металлов.

Рельеф в данном интервале температур образуется за счет разных скоростей распыления, различно ориентированных зерен, их границ, а также различных фаз и структурных составляющих материала и мест концентрации и выхода на поверхность различных типов дефектов строения кристаллической решетки. полученный рельеф состоит из выступов и впадин с глубиной, не превышающей средний размер кристаллитов, хаотически расположенных на поверхности.

К сожалению, практически все представленные модели взаимодействия ионов с твердым телом рассматривают подложку, как однородное, изотропное тело, не учитывая различную кристаллографическую структуру и многочисленные дефекты существующие в твердом теле (точечные, линейные (дислокации), объемные дефекты и границы зерен) поэтому полученные зависимости близки к экспериментальным только для простых материалов и их можно использовать как оценочные только с учетом поправочных коэффициентов полученных экспериментально, для каждого вида конструкционного материала.

Существующие модели рассматривают взаимодействие мишени с моноэнергетическими ионами, в то время как реальные изделия часто подвергаются одновременному воздействию ионов различных масс и энергий, что требует дополнительной экспериментальной проверки.

Для проверки и отработки методики, а также для исследования основных механизмов и моделей взаимодействия, в качестве исследуемых образцов были взяты специальным образом подготовленные и отожженные образцы однокомпонентных материалов с различными кристаллографическими решетками и

прочностными характеристиками.

В таблице 1 приведена краткая характеристика изучаемых материалов.

Таблица 1 – Основные свойства вольфрама, молибдена, меди, железа и титана

Материал	W	Mo	Cu	Fe	Ti	
Тип решетки	ОЦК	ОЦК	ГЦК	ОЦК/ГЦК	ГПУ/ОЦК	
Порядковый номер	74	42	29	26	22	
Атомная масса, а.е.м.	183,8	95,9	63,5	55,8	47,9	
Период решётки, Å	<i>a</i>	3,16	3,15	3,61	0,29/0,35	2,95/3,31
	<i>c</i>	–	–	–		4,68
Плотность, г/см ³	19,25	10,22	8,96	7,86	4,5	
T _{пл} , К	3695	2890	1357	1809	1937	
U ₀ , эВ	8,70	6,82	3,46	4,29	4,34	

Перед облучением образцы проходили стандартную обработку, включающую механическую шлифовку и электролитическое полирование.

Образцы облучались на установке «ВУП – 2КМ», построенной на базе вакуумного универсального поста ВУП – 2К.

Облучение образцов происходит при достижении в рабочей камере давления остаточных газов уровня $\sim 10^{-4}$ Па.

Визуальное изучение поверхности образцов происходило с помощью оптического микроскопа МИМ-7 и растрового электронного микроскопа-микроанализатора (РЭМ) EVO – 50.

Изучение поверхности образцов на РЭМ происходило при ускоряющем напряжении 30 кВ – для образцов Cu, Mo, W и 20 кВ – для образцов Fe.

Определение величин коэффициентов распыления весовым методом

Погрешность измерений веса не превышала ± 10 мкг.

В таблице 2 представлены данные измеренных величин коэффициентов распыления S_p образцов W, Ti, Cu, Fe и Mo при облучении полиэнергетическими однокомпонентными пучками ионов He⁺ и Ar⁺ до доз $\Phi = (2,0 - 2,5) \times 10^{18}$ ион/см² и температурах 100 °С и 500 °С.

Таблица 2 – Коэффициенты распыления (S_p , ат./ион) образцов металлов при облучении пучком ионов He⁺ и Ar⁺ с широким энергетическим спектром (средняя энергия ионов в пучке $\langle E \rangle = 7$ кэВ)

Мишень Т, оС Ионы	Ti		Mo		W		Cu		Fe	
	100	500	100	500	100	500	100	500	100	500
Sp(He ⁺), $\times 10^{-2}$ ат/ион	1,1 \pm 0,5	1,3 \pm 0,5	2 \pm 1	1,4 \pm 0,5	2 \pm 1	3 \pm 1	12 \pm 1	12 \pm 1,0	9 \pm 1	10 \pm 1
Sp(Ar ⁺), ат/ион	4 \pm 1	4,4 \pm 1,0	4 \pm 1	7 \pm 1	4 \pm 1	4 \pm 1	24 \pm 1	25 \pm 1	16 \pm 1	15 \pm 1

Из полученных данных следует, что максимальное значение S_p соответствуют облучению ионами Ar⁺ (7,0 \pm 1,0 ат./ион), а минимальное – He⁺ ((1,0 \pm 0,5) $\times 10^2$ ат./ион). Влияние температуры облучения на величины S_p находятся в пределах ошибок измерений.

Топография поверхности облученных материалов. Фотографии поверх-

ности образцов исследованных материалов после облучения ионами He^+ и Ag^+ до доз $\Phi = (2,0 - 2,5) \cdot 10^{18}$ ион/см² при температурах $T = 100 - 500^\circ\text{C}$, показывают что, наблюдается значительная волнистость поверхности образца Cu . На поверхности образца Fe наблюдаются множественные выступы.

Для образцов Cu наблюдается значительная эрозия поверхности. Заметны характерные элементы: розетки, ямки и вздутия на поверхности. Выявляются границы зёрен. С увеличением температуры облучения поверхность выглаживается как для ионов He^+ , так и для ионов Ag^+ . Отдельные зёрна становятся менее выражены, границы размываются, увеличивается число ямок и розеток. Наблюдается тенденция к увеличению размеров ямок с увеличением температуры. Облучение He^+ приводит к большему выравниванию поверхности, чем облучение Ag^+ . При облучении He^+ наблюдается раздвоение границ зерен. Также видно, что при прочих равных условиях облучение He^+ приводит к возникновению большего числа ямок, чем облучение Ag^+ .

Образцы вольфрама и молибдена ведут себя практически одинаково. Не наблюдается заметных отклонений рельефа поверхности от первоначального. Заметны ямки и поры небольшого размера, а также отдельные крупные вздутия. Количество и размеры пор не зависят от температуры и вида ионов.

Для Fe наблюдается аналогичная картина. Возникают ямки и поры. Выявляется зёрненная структура. Внутри некоторых зёрен возникают периодические структуры. Увеличение температуры приводит к сглаживанию поверхности. Однако границы зерен различимы даже при облучении при $T = 500^\circ\text{C}$. Количество характерных элементов (ямок, пор) практически не зависит от температуры. Наблюдается разброс пор по размерам. Облучение ионами He^+ приводит к большему сглаживанию поверхности, чем облучение ионами Ag^+ . Однако на медных образцах этот эффект выражен сильнее.

Шероховатость поверхности облученных образцов. В таблице 3 представлены данные по измерению шероховатостей образцов до и после облучения.

Таблица 3 – Значения R_a шероховатости поверхностей образцов Cu , Fe , Mo , W и Ti до облучения и после облучения до соответствующих доз

№	Cu			Fe			Mo		
	$R_a(\Phi=0)$, нм	$R_a(\Phi \neq 0)$, нм	ΔR_a , нм	$R_a(\Phi=0)$, нм	$R_a(\Phi \neq 0)$, нм	ΔR_a , нм	$R_a(\Phi=0)$, нм	$R_a(\Phi \neq 0)$, нм	ΔR_a , нм
*	150±7	98±8	52±10	210±7	201±5	9±8	112±6	40±4	72±7
**	143±5	59±5	84±7	180±9	131±7	49±11	91±5	28±5	63±7
***	132±7	74±7	58±9	171±4	213±5	-42±6	122±8	58±4	64±9
****	143±8	109±5	34±9	165±6	332±6	-167±8	128±4	107±5	21±6
*****	147±8	81±7	66±10	208±8	272±4	-64±9	128±7	112±5	16±8
	W			Ti					
	$R_a(\Phi=0)$, нм	$R_a(\Phi \neq 0)$, нм	ΔR_a , нм	$R_a(\Phi=0)$, нм	$R_a(\Phi \neq 0)$, нм	ΔR_a , нм			

*	124±6	89±4	35±7	140±5	131±4	9±6
**	136±6	66±5	70±7	144±5	117±5	27±7
***	138±7	63±5	75±8	152±6	123±4	29±7
****	125±5	67±5	58±7	131±5	123±5	8±7
*****	124±6	61±4	63±7	148±7	130±4	18±8

* – Ag^+ , $T=100\text{ }^\circ C$, $\Phi = 2,0 \cdot 10^{22}$ ион/см²; ** – Ag^+ , $T=300\text{ }^\circ C$, $\Phi = 2,0 \cdot 10^{22}$ ион/см²; *** – Ag^+ , $T=500\text{ }^\circ C$, $\Phi = 2,5 \cdot 10^{22}$ ион/см²; **** – He^+ , $T=300\text{ }^\circ C$, $\Phi = 2,5 \cdot 10^{22}$ ион/см²; ***** – He^+ , $T=500\text{ }^\circ C$, $\Phi = 2,5 \cdot 10^{22}$ ион/см².

Распыление и топография поверхности облученных материалов. В таблице 4 приведены данные по распылению облучаемых материалов. По полученным результатам можно выделить две группы материалов, коэффициенты распыления S_p которых значительно отличаются. К первой группе материалов относятся Ti, Mo, W, а ко второй Fe и Cu.

Максимальный коэффициент распыления соответствует облучению материалов ионами Ag^+ , а минимальный – облучению ионами He^+ .

При повышении температуры до 500 °C изменение коэффициентов распыления незначительно и находится в пределах погрешностей.

При облучении материалов ионами происходит внедрение бомбардирующих частиц на определённую глубину, что приводит к возникновению точечных дефектов в материале и соответствующему распределению их по глубине (гауссоподобное распределение). Параллельно происходит распыление поверхности (Таблица 4). В результате на поверхности образуется специфическая структура. Здесь также можно выделить две группы материалов, которые отличаются толщиной распылённого слоя. К первой относятся Ti, Mo, W, а ко второй Fe и Cu, которые распыляются значительно сильнее.

Таблица 4 – Коэффициенты распыления и толщина распылённого слоя для изучаемых материалов ($\Phi_1=2,0 \cdot 10^{18}$ ион/см² для ионов Ag^+ и $\Phi_2=2,5 \cdot 10^{18}$ ион/см² для ионов He^+)

	$S_p(He^+)$, ат/ион	ΔR_a , нм	х, нм	$S_p(Ag^+)$, ат/ион	ΔR_a , нм	х, нм
W	$(2,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$	58±8	14±3	4,0±1,0	60±8	$(1,4 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Mo	$(2,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$	21±6	13±3	4,0±1,0	63±4	$(1,2 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Cu	$(24 \pm 1) \cdot 10^{-2}$	66±9	56±2	11,0±1,0	84±10	$(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Fe	$(15 \pm 1) \cdot 10^{-2}$	64±8	39±2	9,0±1,0	49±8	$(2,3 \pm 0,5) \cdot 10^3$
Ti	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	18±7	8±3	4,0±1,0	27±6	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^3$

При бомбардировке материалов ионами инертных газов они накапливаются в приповерхностном слое в виде пузырьков или пор. При распылении материала на значительную глубину происходит вскрытие этих полостей, что и наблюдается на образцах Fe и Cu. При повышении температуры облучения число

пор растёт. На рисунке 1 показана диаграмма зависимости плотности пор от условий облучения для Cu.

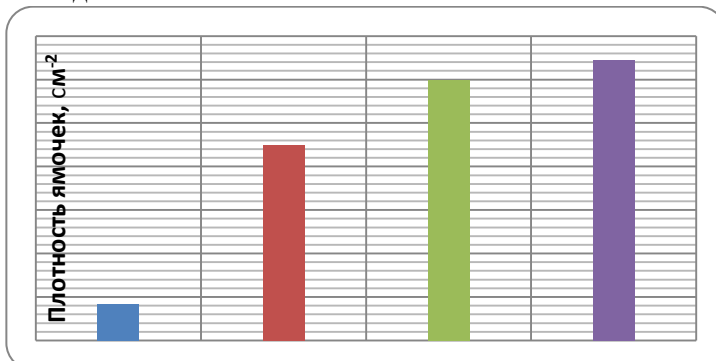


Рисунок 1 – Зависимость плотности пор от условий облучения

Повышение температуры приводит к увеличению подвижности внедрённых атомов инертных газов. Они эффективнее заполняют поры под поверхностью, поэтому число пор растёт. Ионы He⁺ меньше ионов Ar⁺, поэтому они более подвижны. Образуется больше пузырьков, наполненных He, чем Ar.

На поверхности W, Ti и Mo также наблюдаются поры при всех температурах облучения, но их размеры и число меньше, чем на поверхности Cu и слабо зависит от температуры.

Литература

1. Калин Б.А., Гладков В.П., Волков Н.В., Сабо С.Е., Петров В.И., Рыбалко В.Ф., Толстолуцкая Г.Д., Копанец И.Е. Проникновение примесных атомов в материалы при воздействии полиэнергетическим пучком ионов аргона // Известия РАН серия: Металлы, 1994 г. № 6. с.69-73.
2. Калин Б.А., Волков Н.В., Сабо С.Е., и др., Формирование ионно-легированного слоя для повышения эксплуатационных свойств циркониевых сплавов, V Научно-практическая конференция материаловедческих обществ России «Цирконий:металлургия, свойства, применение» Ершово // Москва, 2008. с.41-43.
3. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Ионно-лучевое перемешивание при облучении металлов // Энергоатомиздат, М: 1998.
4. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: сборник статей / сост. Е.С. Машкова; пер. с англ. под ред. Е.С. Машковой // М.: Мир, 1989. 352 с.
5. Зигмунд П. Механизмы и теория физического распыления // С. 46-87.
6. Сабо С.Е., Дислокационно-динамический механизм проникновения примеси в глубь материала и результаты анализа «эффекта дальнего действия» при облучении полиэнергетическими пучками ионов // Информационно-технологический вестник, 2016. Т. 09. № 3. С. 119-133.
7. Сабо С.Е., Волков Н.В., Донской А.Д., Штрафина Е.Д. Имитация влияния космической радиации на эрозию конструкционных материалов // Информационно-технологический вестник, № 1(01)2014. с. 50-57.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 20.06.2019
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,2
Тираж 500 экз.
Заказ № 75-17
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail :keyneslab@gmail.com
Site:www.n-ko.ru